

# **Aquisição de dados LiDAR com TLS e HMLS para deteção de árvores individuais**

**Madalena da Silva Ruivo Coreixas Rascão**

Dissertação para a obtenção do Grau de Mestre em  
**Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais**

Orientadores: Professora Doutora Ana Paula Soares Marques de Carvalho  
Mestre João Gomes Mota

## **Júri:**

Presidente: Doutora Maria da Conceição Brálio de Brito Caldeira, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa.

Vogais: Doutora Ana Paula Soares Marques de Carvalho, Professora Auxiliar do Instituto Superior de Agronomia da Universidade de Lisboa;

Doutor Juan Guerra Hernandez.



*“Se tudo tinha saído das mãos deste  
homem - sem meios técnicos -  
compreende-se que os homens  
possam ser tão eficazes quanto Deus  
em domínios que não a destruição.”*

*Jean Giono. “O Homem que plantava  
árvores”*

## AGRADECIMENTOS

Este trabalho não teria sido possível sem o apoio de algumas pessoas fundamentais.

Começo por agradecer à Prof.<sup>a</sup> Dra. Paula Soares pelo seu apoio e auxílio na elaboração e desenvolvimento deste trabalho, pelos seus conselhos, ajuda e disponibilidade.

Ao engenheiro João Gomes Mota, pela sua disponibilidade e ajuda incansável, por me ter acolhido e integrado na Albatroz pelos esforços reunidos e por ter acreditado neste projeto.

Ao engenheiro Diogo Cosenza, pelo seu cuidado e apoio e auxílio constantes, e acima de tudo, na partilha de conhecimentos.

Ao engenheiro Tiago de Conto, pela sua disponibilidade e partilha de saberes.

Ao engenheiro silvicultor João Pedro Pina, à engenheira Ana Tomás e ao meu colega Andreas Bayer, pelo auxílio incansável no trabalho de campo.

Ao Professor Manuel Campagnolo pelo tempo e disponibilidade e partilha de conhecimentos.

Ao José Marcos Fonseca, ao engenheiro Luís Ferreira e ao engenheiro Luís Leal, representantes da Altri Florestal, pela disponibilidade.

À Cláudia Silva, à Cláudia Cardoso, à Patrícia Silva, e ao Bernardo, da Albatroz Engenharia e ao engenheiro Pedro Brasil, pela colaboração prestada no processamento e levantamentos dos dados deste estudo.

Agradeço ainda o apoio e carinho daqueles que indiretamente contribuíram para este trabalho, à Margarida, à Mónica, à Carolina, ao Alister, à Joana e à Daniela, pelo incentivo, boa disposição e motivação nos momentos mais difíceis.

E por fim, à família. À minha mãe, ao meu pai e ao meu irmão, pelo cuidado e carinho durante os momentos bons e maus.

Um bem-haja a todos!

## RESUMO

LiDAR (Light Detection And Ranging) é um sistema baseado nos princípios de Detecção Remota que permite medir distâncias com base no tempo da trajetória da radiação laser, desde que é emitida pelo aparelho até que retorna ao recetor depois de ser refletida numa superfície sólida. A aplicabilidade deste sistema é abrangente a várias áreas da engenharia e prende-se com a capacidade que o mesmo tem de recolher e armazenar dados tridimensionais em forma de nuvens de pontos de qualquer objeto sólido sobre a superfície terrestre.

No sector florestal, este sistema permite estimar características dos povoamentos e digitalizar uma extensa área de floresta, de uma forma automatizada, rápida e com detalhe na ordem dos milímetros.

O objetivo do presente trabalho é avaliar a capacidade do sistema LiDAR na individualização da árvore comparando as coordenadas estimadas obtidas com dois métodos LiDAR - HMLS (*Held-Hand Mobile Laser Scanner*) e TLS (*Terrestrial Taser Scanner*) - com as coordenadas obtidas com GPS sub-métrico, pelo método tradicional de campo, num ensaio clonal de *Eucalyptus globulus* Labill. com 10 anos de idade.

O presente estudo serviu também como primeira abordagem ao desempenho dos dois métodos LiDAR na obtenção de diâmetros às várias alturas do tronco, recorrendo aos algoritmos disponíveis no *software* R.

Para a detecção das árvores individuais, os resultados demonstraram que, em média, o método TLS detetou 65,1% das árvores, enquanto o método HMLS detetou 44,7% das árvores, para todas as parcelas de estudo.

Comprovou-se ainda que o levantamento com HMLS só é vantajoso para terrenos regulares e percursos retos. Concluiu-se que deve ser efetuada uma melhoria nos processos associados à utilização do algoritmo SLAM (*Simultaneous Localization And Mapping*) e salientou-se a importância de utilizar pontos de referência em campo para a obtenção de nuvens de pontos de melhor qualidade.

**Palavras-chave:** Terrestrial Laser Scanner (TLS); Hand-Held Mobile Laser Scanner (HMLS); LiDAR; localização de árvores; *Eucalyptus globulus* Labill

## ABSTRACT

Light Detection and Ranging (LiDAR) system is based on Remote Sensing principles, that allows to measure distances based on the time course of the laser beam, from its emission until it returns to the sensor after it is reflected on a solid surface. The applicability of this system is wide-ranging in various areas of engineering and relates to its ability to collect and store three-dimensional point cloud data from any solid object on the earth's surface.

In the forestry sector, this system allows the estimation of stand characteristics and the scanning of a large area of forest in an automated, quick and with accuracy in the order of millimeters.

The main propose of the present work is to evaluate the capacity of LiDAR in the tree individualization by comparing the estimated coordinates obtained with two LiDAR methods - HMLS (held-hand mobile laser scanner) and TLS (terrestrial laser scanner) - with the coordinates obtained with GPS by the traditional field method in a clonal *Eucalyptus globulus* Labill. trial with 10 years old.

The present study also served as a first approach to the performance of both LiDAR methods in obtaining diameters at different stem heights, using R algorithms.

For the detection of individual trees, the results showed that, on average, the TLS method detected 65,1% of the trees, while the HMLS method detected 44,7% trees for all study plots.

It has also been shown that HMLS method is only advantageous for regular terrain and straight paths. It was concluded that there should be an improvement in the processes associated with the use of Simultaneous Localization And Mapping (SLAM) algorithm and also the importance of using field reference points to obtain better quality point clouds.

**Keywords:** Terrestrial Laser Scanner (TLS); Hand-Held Mobile Laser Scanner (HMLS); LiDAR; tree location; *Eucalyptus globulus* Labill.

## ÍNDICE

AGRADECIMENTOS .....	ii
RESUMO .....	iii
ABSTRACT .....	iv
ÍNDICE.....	v
ÍNDICE DE FIGURAS .....	vi
ÍNDICE DE QUADROS .....	ix
SIMBOLOGIA .....	x
1. Introdução.....	1
2. Enquadramento .....	3
2.1 <i>Eucalytus globulus</i> Labill. em Portugal.....	3
2.2 Ensaios clonais de eucalipto .....	4
2.3 A análise da forma da árvore .....	5
3. Sistema LiDAR .....	7
3.1 Estado da Arte.....	7
3.2 Funcionamento LiDAR .....	9
3.3 LiDAR e Sistemas de Coordenadas.....	10
3.4 Constituintes e atributos LiDAR .....	11
3.5 Método de Hough Transformation para detetar formas .....	12
4. Materiais e métodos .....	14
4.1 Área de estudo .....	14
4.2 Inventário.....	16
4.2.1 Materiais - método tradicional <i>versus</i> método LiDAR (HMLS e TLS).....	16
4.2.2 Trabalho de campo - método tradicional <i>versus</i> método LiDAR (HMLS e TLS) .....	17
4.3 Processamento dos dados LiDAR .....	21
5. Resultados e discussão.....	23
Etapa 1 – Importação e conversão dos pontos para formato .LAS .....	23
Etapa 2 - Remoção do ruído das nuvens de pontos .....	23
Etapa 3 – Recorte das nuvens de pontos .....	24
Etapa 4 - Filtragem dos pontos do solo.....	25
Etapa 5 - Normalização da nuvem de pontos .....	26
Etapa 6 – Deteção dos centros das árvores .....	28
Procedimentos Adicionais .....	40
6. Conclusões.....	43
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	46
8. WEBGRAFIA .....	49
ANEXOS.....	34

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Evolução das áreas totais por espécie florestal desde 1995 até 2015. Fonte: ICNF (2019), IFN6, junho 2019.....	4
<b>Figura 2</b> - Telerelascópio de Bitterlich. Fonte: Tomé (2014) .....	5
<b>Figura 3</b> - Parabolóides de revolução de maior importância na cubagem de árvores ( $r=0$ cilindro; $r=1/2$ parabolóide ordinário; $r=1$ cone e $r=3/2$ neilóide). Fonte: Tomé (2014). .....	6
<b>Figura 4</b> - Amplitude da recolha de informação por echo waveform (direita) e discrete return (esquerda). Fonte: Finnegan (2011) ( <a href="https://bit.ly/2m1IP6Z">https://bit.ly/2m1IP6Z</a> ).....	7
<b>Figura 5</b> - Representação do funcionamento do SLAM. Fonte: Newsletter Albatroz Engenharia setembro-dezembro (2016). .....	8
<b>Figura 6</b> - Mecanismo de emissão e receção do pulso laser com os tempos e distâncias respetivas. $t_0$ - momento de emissão do pulso; $t_1$ - momento de reflexão do pulso e $t_2$ - momento de captação do retorno do pulso. $D_1$ - distância entre o sensor e a câmara e $D_2$ - distância entre o sensor e o objeto. Imagem adaptada de Vosselman et al. (2007). .....	10
<b>Figura 7</b> - Componentes de um ponto em sistema de referência celeste equatorial num plano XYZ. Fonte: Paul (2018).....	10
<b>Figura 8</b> - Nuvens de pontos resultantes da recolha de dados de um povoamento florestal de eucalipto com LiDAR. Os pontos verdes foram classificados como vegetação (copas das árvores e subcoberto). Os pontos castanhos foram classificados como solo. Créditos: Diogo Cosenza.....	12
<b>Figura 9</b> - Método de Hough Transformation numa secção de um cilindro. Fonte: Conto (2017).....	13
<b>Figura 10</b> - Classificação de Koppen no território continental português. Fonte: IPMA. ....	14
<b>Figura 11</b> - Talhão 24 da propriedade Calha do Grou. A linha azul representa os limites do talhão 24. Imagem obtida no Google Earth em 2019, logo após o corte dos eucaliptos estudados.....	15
<b>Figura 12</b> - Em cima: parcelas e fuste de clones classificados como maus; abaixo: parcelas e fuste de clones classificados como muito bons. Créditos: P. Soares.....	15
<b>Figura 13</b> - Laser Velodyne VLP-16. À esquerda o modelo original, ao centro e à direita o modelo criado pela Albatroz Engenharia. ....	16
<b>Figura 14</b> - Localização das parcelas de amostragem obtidas com GPS sub-métrico no dia 5 de abril de 2019; p3 e p4 – parcelas clones “muito bons”; p5 e p6 – parcelas clones “maus”. .....	18
<b>Figura 15</b> - Área de estudo e respetiva localização das parcelas. Imagem obtida no Google Earth (2019). .....	18



<b>Figura 16</b> - Processamento das árvores abatidas com processador e registo das medições de cada árvore. Créditos: P. Soares.....	19
<b>Figura 17</b> - À esquerda, o percurso do operador com HMLS em concordância com o comprimento da parcela; à direita, percurso do operador em concordância com a largura da parcela. Os círculos verdes simbolizam as árvores, a vermelho o percurso realizado pelo operador.....	20
<b>Figura 18</b> - Operadores de levantamento com HMLS; a imagem foi obtida em pinhal na Mata Nacional de Leiria.....	20
<b>Figura 19</b> - Montagem do ABZ-TRAX301 na caixa da carrinha e no tejadilho do veículo. ...	21
<b>Figura 20</b> - Procedimentos efetuados para o processamento dos dados LiDAR.....	22
<b>Figura 21</b> - Visualização de uma nuvem de pontos LiDAR na interface do PLMI. Os pontos cinzentos no fundo azul escuro representam os pontos LiDAR com a sua posição relativa. À esquerda está a visão de cima da nuvem e à direita a visão de uma das laterais da nuvem. ....	23
<b>Figura 22</b> - Visualização em CloudCompare de uma nuvem de pontos com ruído antes (à esquerda) e depois (à direita) de ser filtrada. ....	24
<b>Figura 23</b> - Recorte da nuvem de pontos LiDAR e shapefile da parcela 6 com a ferramenta Extract LAS do ArcMap .....	25
<b>Figura 24</b> - Normalização da parcela 5 pelo método TLS, perspetiva lateral da parcela. À esquerda, a nuvem de pontos antes da normalização e à direita a mesma nuvem de pontos normalizada. A vermelho - pontos classificados como solo; a azul - pontos classificados como vegetação.....	28
<b>Figura 25</b> - Posições das árvores da parcela 3, de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul). ....	35
<b>Figura 26</b> - Posições das árvores da parcela 3 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul). ....	35
<b>Figura 27</b> - Posições das árvores da parcela 4 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul). ....	36
<b>Figura 28</b> - Posições das árvores da parcela 4 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul). ....	36
<b>Figura 29</b> - Posições das árvores da parcela 5 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul). ....	37
<b>Figura 30</b> - Posições das árvores da parcela 5 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul). ....	37

<b>Figura 31</b> - Posições das árvores da parcela 6 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul) .....	38
<b>Figura 32</b> - Posições das árvores da parcela 6 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul).....	38
<b>Figura 33</b> - Percentagens de detecção das árvores por parcela pelos métodos TLS e HMLS em relação ao número de árvores determinado pelo método tradicional.....	39
<b>Figura 34</b> - Visualização da nuvem de pontos da parcela 5 pelo método TLS (à esquerda) e a segmentação da mesma nuvem de pontos pelo comando plotCylinder (à direita).....	40
<b>Figura 35</b> - Gráfico representativo dos perfis do tronco da árvore 1 da parcela 4 de acordo com os diâmetros do quadro anterior .....	41

## ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1 - Atributos e respetiva descrição de uma nuvem de pontos LiDAR.....	12
Quadro 2 - Argumentos da função csf(), respetiva descrição e valores adotados no estudo. .....	26
Quadro 3 - Argumentos da função map.hough(), respetiva descrição e valores adotados no estudo. ....	29
Quadro 4 – Resultados dos comandos TreeMap() e treepositions() para todas as parcelas pelos dois métodos. ....	30
Quadro 5 - Diâmetros estimados e observados da árvore 1 da parcela 4, resultantes do comando fit_RANSAC_circle.....	41

## SIMBOLOGIA

<b>ALS</b>	Airborne Laser Scanning
<b>CHB</b>	Altura da base da copa ( <i>Canopy Height Base</i> )
<b>Cs, Csa, Csb</b>	Classes da escala de Classificação de Koppen
<b>DAP</b>	Diâmetro à Altura do Peito
<b>DGPS</b>	Differential Global Positioning System
<b>DR</b>	Deteção Remota
<b>FOV</b>	Campo de visão ( <i>Field of view</i> )
<b>GPS</b>	Global Positioning System
<b>H</b>	Altura total ( <i>Height</i> )
<b>HMLS</b>	Hand-Held Mobile Laser Scanner
<b>ICNF</b>	Instituto de Conservação da Natureza e das Florestas
<b>IFN</b>	Inventário Florestal Nacional
<b>IMU</b>	Inertial Measurement Unit
<b>LiDAR</b>	Light Detection and Ranging
<b>MDT</b>	Modelo Digital de Terreno
<b>MLS</b>	Mobile Laser Scanner
<b>PLMI</b>	Power Line Maintenance Inspection
<b>PLS</b>	Personal Laser Scanner
<b>PRR</b>	Taxa de Repetição de pulso ( <i>Pulse Repetition Rate</i> )
<b>RANSAC</b>	Random Sample Consensus
<b>SLAM</b>	Simultaneous Localisation and Mapping
<b>SOR</b>	<i>Statistical Outlier Removal</i>
<b>TLS</b>	Terrestrial Laser Scanner
<b>USDA</b>	United States Department of Agriculture
<b>VANT</b>	Veículo Aéreo não tripulado

## 1. Introdução

No âmbito do ramo de Gestão de Recursos Florestais do mestrado em Engenharia Florestal e de Recursos Naturais no Instituto Superior de Agronomia, desenvolveu-se o presente estudo com o objetivo de avaliar o desempenho do sistema Light Detection and Ranging (LiDAR) na individualização da árvore em povoamentos de eucalipto. Os objetivos específicos prendem-se com o pré-processamento e processamento dos dados LiDAR por Terrestrial Laser Scanner (TLS) e Hand-Held Mobile Laser Scanner (HMLS) para obtenção das coordenadas estimadas das árvores e posterior análise comparativa com as coordenadas observadas com GPS pelo método tradicional. O presente estudo, serviu ainda como uma primeira abordagem ao desempenho dos dois métodos LiDAR para a obtenção de diâmetros às várias alturas do tronco em povoamentos de eucalipto.

Nos programas florestais de melhoramento genético desenvolvidos pelas empresas de indústria madeireira e papelreira, existe um interesse primordial em selecionar os clones com melhores condições de adaptabilidade e melhores características tecnológicas que contribuam para o aumento de produção. Um dos atributos da árvore que se relaciona diretamente com a produção é a forma da mesma. De facto, a crescente melhoria nas cadeias de processos para a produção de madeira e pasta tem demonstrado ser cada vez mais necessária a caracterização detalhada da forma da árvore, nomeadamente, a forma do tronco e as características dos ramos (Newnham et al. 2015).

No entanto, obter medições rigorosas em meios naturais é praticamente impossível, devido à complexidade estrutural das florestas. Por esse motivo, para avaliar sistematicamente a composição e estrutura dos povoamentos, durante um longo período, recorre-se às parcelas de amostragem, a partir das quais são extrapolados valores médios e/ou totais das variáveis dendrométricas calculadas, sendo que o rigor e qualidade dos dados recai sobre estimativas em vez de recair sobre valores reais.

A análise da forma da árvore é efetuada com recurso a medições dos diâmetros às várias alturas, podendo ser para isso utilizado o telerelascópio de Bitterlich, que deve ser manuseado apontando o equipamento para a árvore que se pretende medir e, sucessivamente, apontar para os vários níveis do tronco (Barreiro et al. 2004, Tomé 2014). Este método torna-se impraticável quando o objetivo é medir todas as árvores de um povoamento, devido ao tempo despendido e aos custos associados.

O sistema LiDAR tem vindo a comprovar ser um método útil e válido quando se fala de obter medições de árvores individuais com uma boa relação preço/qualidade/rigor dos resultados. As plataformas móveis têm comprovado ter melhor desempenho quando comparadas com as plataformas estáticas (Bauwens et al. 2016; Liang et al. 2018).

A qualidade dos resultados obtidos com LiDAR depende de duas etapas: o levantamento da área ou objeto e o processamento dos dados recolhidos. A qualidade do levantamento prende-se com as características eletrónicas do laser (campo de visão, densidade de pulsos, classificação das nuvens...) e com as características relativas às condições do solo e do povoamento (declive, densidade do povoamento, irregularidade do terreno...), enquanto que a qualidade do processamento está relacionada com a escolha dos melhores algoritmos e parâmetros a usar na manipulação dos dados recolhidos no levantamento. Quando se trata de levantamento com um método LiDAR terrestre, a qualidade dos resultados obtidos com LiDAR, prende-se essencialmente com os seguintes fatores: a velocidade de andamento do LiDAR - causando instabilidade do equipamento o que resulta em nuvens de pontos com densidades incoerentes, afetando a qualidade da distribuição espacial das amostras, a perturbação causada pelas irregularidades do terreno e a incompatibilidade do diâmetro da árvore no intervalo selecionado (Zhou et al. 2019).

Os dados de campo foram levantados de um povoamento clonal de *Eucalyptus globulus* Labill., na propriedade Calha do Grou pertencente à empresa Altri Florestal e os equipamentos LiDAR foram disponibilizados pela empresa Albatroz Engenharia.

Este trabalho está organizado em seis capítulos, sendo que, o primeiro (Enquadramento), inicia-se com uma revisão bibliográfica e abordam-se os conceitos teóricos envolvidos no estudo em questão; no segundo (Sistema LiDAR), expõem-se as vantagens, desvantagens e características do sistema LiDAR; no terceiro capítulo (Materiais e métodos) apresentam-se os equipamentos e os procedimentos inerentes ao processamento dos dados levantados; no quarto capítulo (Resultados) apresentam-se os resultados das nove etapas de processamento dos dados LiDAR; e, por fim, no quinto capítulo (Conclusões) apresentam-se as conclusões.

## 2. Enquadramento

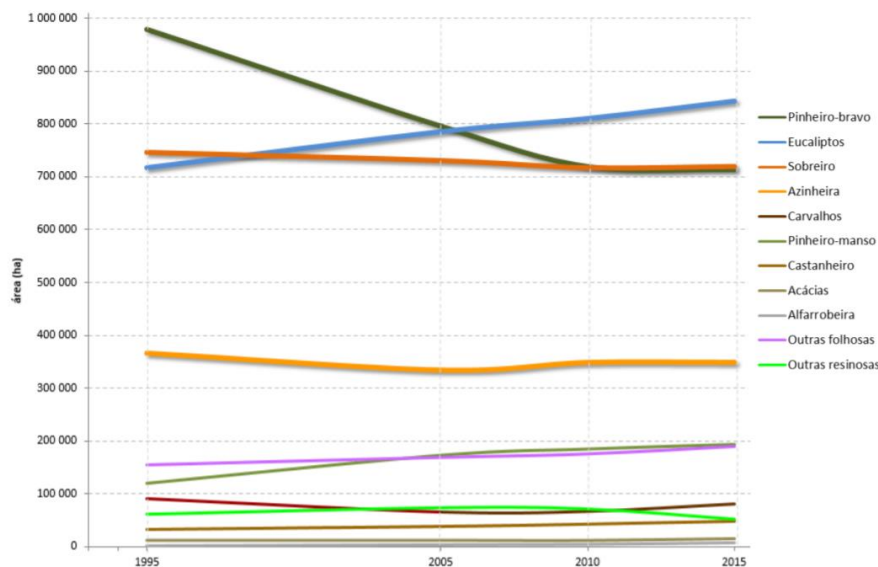
### 2.1 *Eucalyptus globulus* Labill. em Portugal

A floresta é um elemento fundamental na providência dos serviços de ecossistemas, desde o sequestro de carbono, bioenergia e na reserva de carbono, tornando-se um objeto de estudo crucial quando se trata de compreender as mudanças climáticas inerentes ao nosso planeta (Krooks et al. 2014, Liang et al. 2018). Para além de ser um elemento essencial na conservação, proteção e equilíbrio dos ecossistemas, a floresta é, simultaneamente, uma fonte de matérias-primas naturais. E, paradoxalmente ao que seria de esperar, a crescente preocupação com a sustentabilidade do planeta, desencadeou, pelas sociedades mais desenvolvidas, uma crescente procura de matérias-primas de origem natural, exigindo uma melhoria nas cadeias de processos para a produção de madeira e pasta (Newnham et al. 2015).

Das muitas espécies florestais de interesse industrial, a *Eucalyptus globulus* Labill. é a espécie exótica de maior interesse económico em Portugal, que tem vindo a beneficiar de um contínuo investimento por parte das empresas de pasta, na implementação, manutenção e desenvolvimento de Programas de Melhoramento Genético (Almeida et al. 2005).

Não se sabe ao certo quando esta espécie, identificada e batizada pelo botânico francês Labillardière durante o século XVIII, surgiu pela primeira vez em Portugal. Algumas fontes defendem que os primeiros exemplares terão sido plantados em Vila Nova de Gaia entre 1820 e 1830 (Borrinho et al. 2007). Ainda segundo os mesmos autores, das espécies de eucaliptos existentes em Portugal, a *Eucalyptus globulus* Labill. reconhece-se ser aquela que apresenta maior produtividade e vigor, sendo, por isso, alvo de programas de melhoramento genético.

A área de eucalipto em Portugal teve a sua expansão entre as décadas de 60 e 90 devido à sua aptidão como espécie industrial para pasta de papel (Alves et al. 2007), tendo vindo a aumentar ao longo dos anos (Figura 1). Segundo dados do 6º Inventário Florestal Nacional (ICNF, 2019), o eucalipto é a principal espécie da floresta portuguesa, com uma área de povoamentos puros e dominantes de 844 mil hectares, representando um aumento de 58 mil hectares (7,4%) entre 2005 e 2015.



*Figura 1 - Evolução das áreas totais por espécie florestal desde 1995 até 2015. Fonte: ICNF (2019), IFN6, junho 2019.*

O consumo industrial de eucalipto é superior ao corte nacional para a espécie, havendo necessidade de importar madeira. A estimativa, para o futuro, é que a diferença entre oferta e procura se venha a acentuar, sendo essa diferença mais nítida num cenário de manutenção das tendências quando comparado com um cenário de desenvolvimento florestal (AIFF 2013). O aumento da madeira a corte pode ser conseguido através de melhoria das práticas silvícolas e/ou do melhoramento genético. Daí a importância de plantas clonais resultantes de um programa de melhoramento florestal adequado e sustentado. No programa de melhoramento do RAIZ – Forest and Paper Research Institute (Aveiro/Portugal), são feitas avaliações a partir dos 3 anos, para o volume, a densidade, o rendimento em pasta, a tolerância a pragas e doenças e à capacidade de enraizamento.

## 2.2 Ensaios clonais de eucalipto

O sucesso associado aos programas de melhoramento na cultura do eucalipto está fortemente relacionado com o valor genético das plantas utilizadas, com a proporção destas nas plantações e com o seu comportamento nas condições de campo. Estas últimas dependem fortemente do bom uso das técnicas silvícolas desde a distribuição das plantas melhoradas, técnicas de instalação e o modo de condução e exploração dos povoamentos de eucalipto (Guimarães 1991).

As características do eucalipto que lhe fornecem superioridade são maioritariamente aditivas (resistência à seca, adaptação às condições edafo-climáticas e características



tecnológicas da madeira). No entanto, o aumento da produtividade é condicionado por fatores externos ambientais, como défices hídricos sazonais, baixa produtividade dos solos, ocorrência de geadas ou incêndios florestais; sociais e económicos como o tipo de propriedade florestal, a gestão da mesma, a formação dos operadores florestais e o enquadramento legal da floresta de eucalipto em Portugal (Borém 2007).

A maioria das empresas de indústria papaleira apostam num programa de melhoramento baseado em clones que visa a contínua melhoria dos indivíduos, replicando aqueles que apresentam melhores condições de adaptação, crescimento e características tecnológicas da madeira, isto porque o melhoramento genético depende essencialmente da heritabilidade das características de interesse (Almeida et al. 2005).

Dentro do programa de melhoramento genético, a seleção dos indivíduos superiores é realizada a partir dos ensaios de proveniência. A seleção desses indivíduos passa por avaliar os seus fenótipos, nomeadamente, a forma (do fuste) da árvore que apesar de não ter uma componente genética forte, influencia diretamente o volume, que, em contrapartida, apresenta uma componente genética forte.

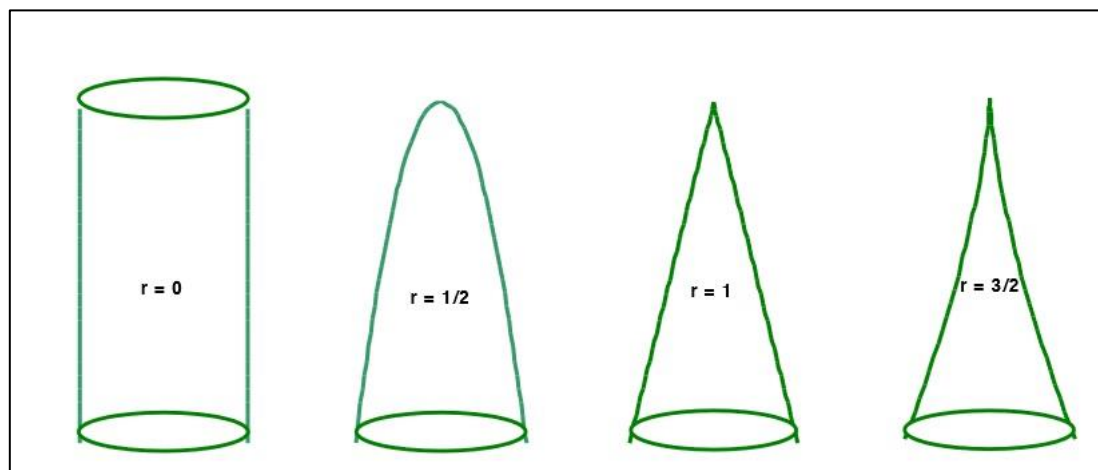
### 2.3 A análise da forma da árvore

A análise da forma da árvore pode ser efetuada com recurso a medições dos diâmetros as várias alturas, sendo para isso utilizado o telerelascópio de Bitterlich (Figura 2). A sua utilização exige que o operador se coloque a uma distância da árvore previamente definida, a partir da qual é efetuada a medição do diâmetro. Esta consiste em fazer coincidir a largura do tronco com a escala graduada que surge no visor do equipamento, sucessivamente e para os vários níveis do tronco (Barreiro et al. 2004).



Figura 2 - Telerelascópio de Bitterlich. Fonte: Tomé (2014)

A forma da árvore é um parâmetro que depende da componente genética e da influência dos fatores ambientais. A componente genética é determinística; no entanto, não há duas árvores iguais pois a forma da árvore é maioritariamente adaptativa (Alves et al. 2012). A forma de uma árvore varia entre o cilindro e o neilóide (Figura 3) e pode ser expressa por coeficientes ou por quocientes de forma. O coeficiente de forma devolve a relação entre o volume real da árvore e o volume de um parabolóide de revolução, com base igual à área basal e altura da árvore (Tomé 2014, Newham et al. 2015).



*Figura 3 - Parabolóides de revolução de maior importância na cubagem de árvores ( $r=0$  cilindro;  $r=1/2$  parabolóide ordinário;  $r=1$  cone e  $r=3/2$  neilóide). Fonte: Tomé (2014).*

A otimização da forma da árvore é um dos objectivos-chave quando se fala de melhoramento genético no contexto florestal. Com as melhorias na produção de madeira e nas cadeias de processo, tem sido cada vez mais necessária a caracterização detalhada da forma da árvore, nomeadamente, a forma do tronco e características dos ramos, preferindo-se árvores com algumas características superiores, nomeadamente, a retidão do fuste, a inexistência de ramos vivos e a semelhança com a forma cilíndrica (Savill et al. 1997).

### 3. Sistema LiDAR

#### 3.1 Estado da Arte

O sistema LiDAR (Zhang et al. 2003, Morsdorf 2004, Liang et al. 2018) está baseado no conceito do efeito fotoelétrico concebido por Einstein, que mais tarde deu origem ao desenvolvimento do primeiro laser por Theodore Maiman, em 1960 (Carson et al. 2004). Entre 1970 e 1980, surgiu o sistema de perfilamento laser aéreo, o *Airborne Laser Profiling System*, utilizado para recolha de dados topográficos (Giongo et al. 2010). Este foi rapidamente ultrapassado, devido ao aumento do interesse comercial associado a este conceito, dando lugar ao *Terrestrial Laser Scanner* (TLS), um sistema de LiDAR terrestre com capacidade de digitalização laser e complementado por unidades de georreferenciação, GPS e IMU (*Inertial Measurement Unit*), na década de 90 do século passado.

A primeira citação que se conhece sobre a aplicação do sistema LiDAR à floresta é de 1996 (Carson et al. 2004). Consta-se que os países europeus estiveram na vanguarda da utilização deste sistema para fins florestais, tendo sido a Noruega o país que registou a primeira investigação do potencial do LiDAR em dados de inventário florestal. Seguiu-se a Suécia e a Finlândia (Carson et al. 2004). A evolução do *Airborne Laser Scanning* (ALS) para sistemas de ondas contínuas (*echo waveform*) permitiu registar integralmente todo o sinal do pulso possibilitando a obtenção de informação detalhada nas várias camadas do povoamento (Figura 4), permitindo caracterizar os vários parâmetros da estrutura do povoamento com elevada precisão (Mucke et al. 2013, Newnham et al. 2015, Raumonon et al. 2015, Liang et al. 2016).

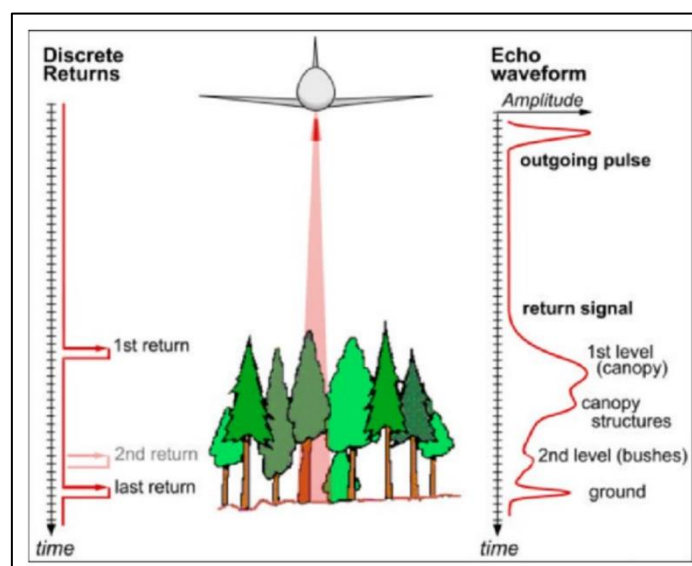


Figura 4 - Amplitude da recolha de informação por echo waveform (direita) e discrete return (esquerda). Fonte: Finnegan (2011) (<https://bit.ly/2m1P6Z>).

Em 2010 surgiu o *Mobile Laser Scanner* (MLS) com a facilidade de poder ser acoplado a uma plataforma cinemática como um veículo todo-terreno ou uma Moto-4. Este foi substituído por um sistema com melhor portabilidade desenvolvido pelo *Finnish Geodetic Institute*, em 2012, o *Personal Laser Scanner* (PLS) (Bauwens et al. 2016). Este funcionava com os mesmos princípios do MLS, mas a plataforma cinemática passou a ser o movimento do operador que carregava o aparelho nas costas ou na mão. No entanto, verificava-se que a precisão das posições era reduzida devido à fraca receção do sinal GPS dentro da densa cobertura florestal.

O maior desafio na aplicação deste sistema ao inventário florestal, está relacionado com o processamento dos dados LiDAR e, para tal, vários trabalhos têm sido desenvolvidos em busca de metodologias e algoritmos funcionais que permitam obter resultados mais rigorosos e automatizados seja na fase de pré-processamento como na fase de processamento dos dados.

Este sistema rapidamente foi superado pelo HMLS (*Hand-held Mobile Laser Scanner*), um sistema com os mesmos princípios do MLS, excetuando o *Global Positioning System* (GPS), que foi complementado pelo *Simultaneous Localization and Mapping* (SLAM) (Figura 5) permitindo a georreferenciação constante dos pontos registados pelo sensor mesmo quando o sinal de receção GPS é fraco (Bauwens et al. 2016).

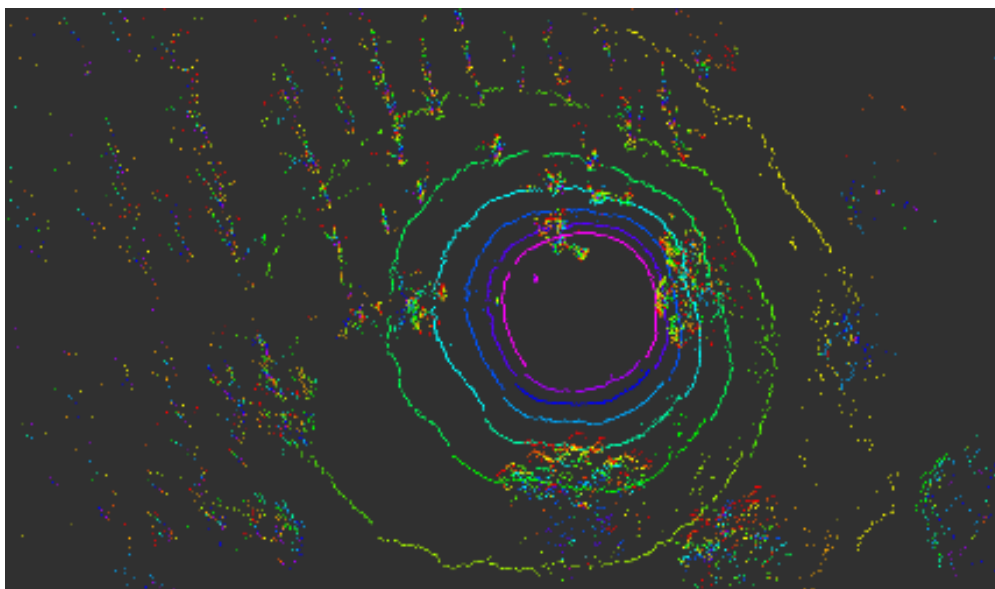


Figura 5 - Representação do funcionamento do SLAM. Fonte: Newsletter Albatroz Engenharia setembro-dezembro (2016).

O HMLS apresenta uma enorme vantagem em relação aos outros aparelhos, nomeadamente a possibilidade do número ilimitado de posições de digitalização aquando do

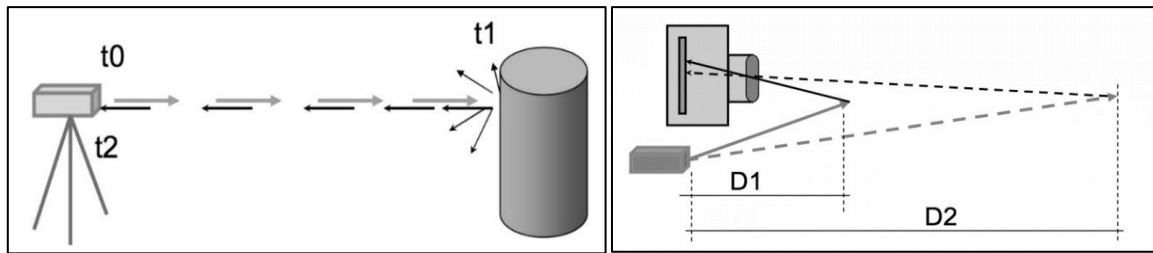
levantamento, minimizando o efeito oclusão que é evidente nos restantes métodos, principalmente no TLS (Bauwens et al. 2016). Esta característica revela grande interesse na medida em que permite a obtenção de valores muito credíveis para as variáveis dendrométricas como o diâmetro e a altura total de árvores individuais (Krooks et al. 2014, Newnham et al. 2015, Raumonen et al. 2015, Liang et al. 2016). A versatilidade do HMLS é útil para a avaliação de outros parâmetros que, tradicionalmente, implicam o abate da árvore, como a análise da forma da árvore (Ryding et al. 2015).

As medições realizadas em campo com plataformas móveis são mais promissoras na resolução de problemas e estima-se que sejam mais rápidas, na ordem dos 10 minutos, do que as técnicas estáticas (Liang et al. 2018). No entanto, à data deste trabalho, não se conhecia ao certo a precisão e rigor das medições obtidas por sistemas móveis, sabia-se apenas que, entre digitalização estática e digitalização móvel, ambas as técnicas servem para avaliar florestas homogêneas, e só a primeira serve para avaliar florestas heterogêneas (Liang et al. 2018).

### **3.2 Funcionamento LiDAR**

O funcionamento do sistema LiDAR está baseado nos princípios de Detecção Remota (DR), que permitem medir distâncias, através do tempo, da trajetória da radiação laser, desde que é emitida pelo aparelho até que retorna ao recetor, depois de ser refletida numa superfície sólida ou translúcida/parcialmente refletora.

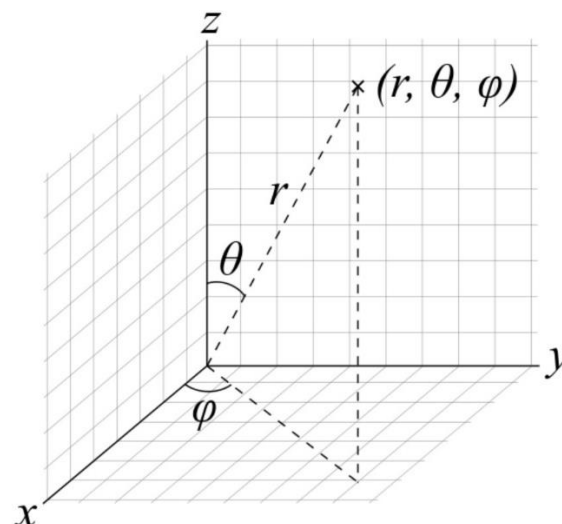
O cálculo das posições geográficas dos objetos intersetados pelo LiDAR durante a digitalização, ocorre de acordo com um mecanismo de triangulação representado na Figura 6 em que a distância entre o emissor laser e o objeto intersetado é determinada tendo em conta o intervalo de tempo decorrido desde a emissão do pulso laser até ao momento de receção do pulso (ou seja, o retorno) no sensor recetor. Conhecendo a localização geográfica do sensor LiDAR é possível converter e calcular a posição, geograficamente referenciada, do objeto intersetado.



*Figura 6 - Mecanismo de emissão e recepção do pulso laser com os tempos e distâncias respectivas.  $t_0$  - momento de emissão do pulso;  $t_1$  - momento de reflexão do pulso e  $t_2$  - momento de captação do retorno do pulso.  $D_1$  - distância entre o sensor e a câmera e  $D_2$  - distância entre o sensor e o objeto. Imagem adaptada de Vosselman et al. (2007).*

### 3.3 LiDAR e Sistemas de Coordenadas

Quando o pulso laser retorna ao sensor, as coordenadas registradas vêm em coordenadas esféricas (Paul 2018). Este tipo de coordenadas pode ser definido num sistema de referência celeste equatorial (Matos 2007). As coordenadas esféricas são definidas por uma distância geocêntrica ( $r$ ), um ângulo designado por ascensão reta ( $\theta$ ) e outro ângulo designado por declinação ( $\varphi$ ). A ascensão reta é a direção do ponto medida no plano do equador, a declinação é o ângulo definido pela direção do ponto medido e o Pólo Norte (Matos 2007). Assim, os pontos resultantes deste sistema de coordenadas são do tipo  $(r, \theta, \varphi)$  e recaem num plano XYZ, como mostra a Figura 7.



*Figura 7 - Componentes de um ponto em sistema de referência celeste equatorial num plano XYZ. Fonte: Paul (2018).*

Não obstante, a maioria das implementações práticas trabalha com coordenadas polares 2D que são mais simples, sendo o segundo ângulo fixo e, idealmente, alinhado com um dos eixos/planos.

As coordenadas esféricas podem ser facilmente convertidas para um sistema de coordenadas cartesianas e, conseqüentemente, para outros sistemas de coordenadas. De facto, os LiDAR já vêm com esse processo de conversão computadorizado, que pode ser consultada nos manuais de instrução dos LiDAR (Paul 2018).

Quando as nuvens de pontos LiDAR são exportadas, elas podem tomar o formato .LAS que inclui toda uma série de informação, nomeadamente, a informação sobre o sistema de coordenadas dos pontos. No entanto, é muito comum que essa informação venha codificada em formato GeoTIFF (Safe Software, N/A) dificultando o processo de conversão das coordenadas. Este constrangimento pode ser contornado pedindo essa informação diretamente aos fornecedores do LiDAR. No presente estudo, o sistema de coordenadas dos dados LiDAR recolhidos estão em WGS84.

### 3.4 Constituintes e atributos LiDAR

Por norma, um sistema LiDAR é composto por (Kersting et al. 2004, Alves 2010, Giongo et al. 2010, Uzquiano et al. 2014, Wilkes et al. 2017, Liang et al. 2018):

- (a) um sensor laser que emite radiação eletromagnética em ondas curtas, 1-10  $\mu m$  (Giongo et al. 2010);
- (b) um recetor GPS com precisão diferencial (por ex., DGPS) ou superior (por ex., SLAM);
- (c) uma Unidade de Medições Inerciais (IMU) ou um Sistema Inercial de Navegação (INS);
- (d) um espelho giratório, que cria a extensão dos pulsos laser;
- (e) adicionalmente, um TLS tem um sistema rotativo que permita varrer as diferentes declinações ( $\varphi$ ) (Figura 7).

As nuvens de pontos resultantes de um levantamento LiDAR são comumente exportadas em ficheiros .LAS com um determinado formato, incluindo um conjunto de atributos úteis para a fase de processamento dos dados. O Quadro 1 apresenta alguns atributos de uma nuvem de pontos LiDAR (formato 0) que, pela natureza do presente estudo, se consideraram de maior relevância, juntamente com uma breve descrição de cada um deles. A informação completa deste Quadro pode ser consultada em ASPRS (2013).

Quadro 1 - Atributos e respetiva descrição de uma nuvem de pontos LiDAR

Atributo	Descrição
X	Coordenadas XX
Y	Coordenadas YY
Z	Coordenadas ZZ (altimetria)
Intensity	Representação da magnitude do retorno; útil para juntar nuvens de pontos de diferentes sensores
Return number	Número do pulso quando retorna ao laser na devida sequência; no caso de lasers com discrete return, este parâmetro varia entre First Return (1) e Second Return (2)
Number of returns	Número total de retornos de um pulso
Classification	Classes de um ponto. Pode variar entre 0 e 31 (ver tabela 9 de ASPRS 2013)

A integração de toda a informação recolhidas pelos vários componentes do sistema LiDAR, permite posicionar com elevada precisão todos os objetos intersetados, gerando ficheiros de nuvens de pontos georreferenciadas, como o exemplo representado na Figura 8.

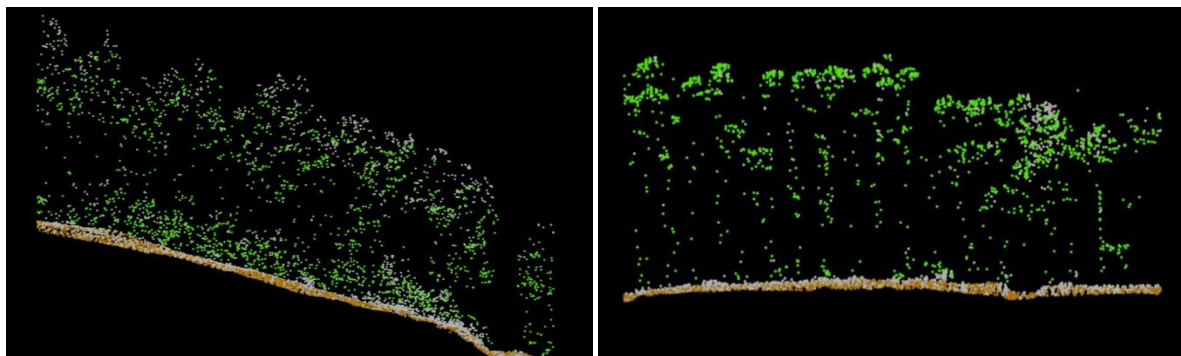


Figura 8 - Nuvens de pontos resultantes da recolha de dados de um povoamento florestal de eucalipto com LiDAR. Os pontos verdes foram classificados como vegetação (copas das árvores e subcoberto). Os pontos castanhos foram classificados como solo. Créditos: Diogo Cosenza.

### 3.5 Método de Hough Transformation para detetar formas

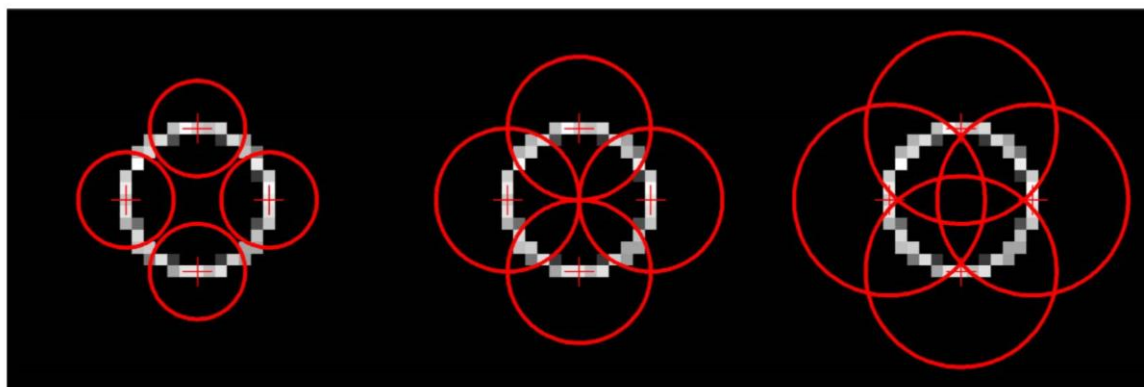
Uma forma de modelar uma árvore é recorrer a um conjunto de primitivas geométricas que melhor represente a superfície e a topologia do tronco e dos ramos, escolhendo aquele que melhor se adequa na reconstrução dos modelos da árvore a partir de nuvens de pontos (Akerblom et al. 2015). Essa modelação pode ser efetuada recorrendo a dois métodos principais – com base no Modelo de Altura de Copas (*Canopy Height Model*) (CHM) ou através do método matemático conhecido por *Hough Transformation* (Transformada de Hough) (Roussel et al. 2019).

Vários autores já desenvolveram algoritmos que se baseiam no modelo das copas (CHM) para segmentar as árvores (Kaartinen et al. 2012, Li et al. 2012, Swetnam et al. 2014,



Khosravipour et al. 2015, Zhang et al. 2015, Zhang et al. 2016) mas existem vários problemas associados a esses métodos, nomeadamente, a ocorrência de erros e incertezas devido aos métodos de interpolação e ao espaçamento das grelhas. Para além disso, os métodos de suavização Gaussiana podem criar subestimação ou sobrestimação dos resultados.

O Método de Hough Transformation baseia-se na identificação de padrões geométricos regulares, neste caso círculos, em representações bidimensionais de segmentos de árvores, (Figura 9) seguindo-se a identificação dos melhores parâmetros circulares de forma iterativa recorrendo aos mínimos quadrados, conhecida como abordagem RANdom SAsple Consensus (RANSAC) (Conto 2016). Este é um método robusto para detecção de formas em duas dimensões (2D), que encontra padrões específicos de acordo com uma forma 2D primitiva.



*Figura 9 - Método de Hough Transformation numa secção de um cilindro. Fonte: Conto (2017).*

A aplicação deste método permite segmentar verticalmente a nuvem de pontos de uma árvore, gerando segmentos verticais de comprimento e cota específicos, que determinam as dimensões de cada subseção. As subseções são processadas individualmente para obtenção dos parâmetros de círculo estimados (coordenadas X e Y e raio), nomeadamente, os diâmetros às várias alturas do tronco (Conto, 2016).

Este método é utilizado como base em vários comandos do pacote TreeLS do R, desenvolvido por Conto (2016), nomeadamente, para a localização das posições dos centros de massa das árvores, através do comando `treeMap()`, e na segmentação dos troncos das árvores, através do comando `stemPoints()`.

Este método tem as vantagens de incorporar as condições do levantamento, os atributos dos dados e as características do terreno da área estudada.

## 4. Materiais e métodos

### 4.1 Área de estudo

A região de Portugal Continental está dividida em duas classes de clima segundo a escala de classificação de Koppen - a classe Csa e a classe Csb (Figura 10). A primeira classe (a laranja) corresponde a um clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e quente, a segunda (a verde) corresponde a um clima temperado com Inverno chuvoso e Verão seco e pouco quente. O distrito de Santarém integra influências Atlântica e Continental e como apresenta um clima chuvoso e moderadamente quente com chuvas preponderantes de inverno é classificado como sendo do tipo Cs, considerando o facto da temperatura média do mês mais quente ser inferior a 22°C, este distrito é integrado no sub-tipo Csb.

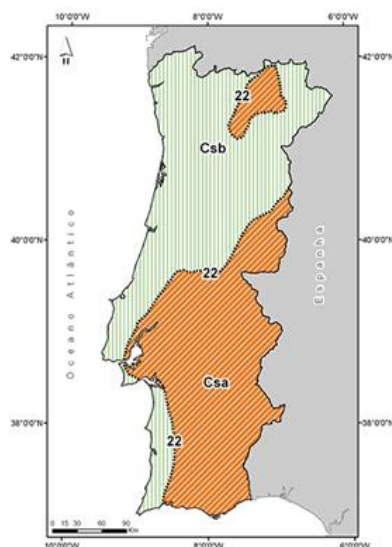


Figura 10 - Classificação de Koppen no território continental português. Fonte: IPMA.

A área de estudo insere-se na classe Csa. Nesta região a temperatura média anual está entre os 15,1-16°C e apresenta uma precipitação média anual entre 601-800 mm (dados baseados nas normais de 1961/1990).

A área de estudo está inserida na propriedade Calha do Grou pertencente à empresa Altri Florestal, no distrito de Santarém. As parcelas de estudo foram marcadas no talhão 24. A área total do talhão 24 é de 3,1 ha com vários clones de eucalipto plantados a compasso 4 m x 1,8 m, em 2006 (Figura 11).

Na área de estudo existem vários clones distribuídos por manchas (ANEXO 1). Seleccionaram-se 3 clones designados por clones “muito bons” e “maus”, tendo em conta a forma da árvore e a irregularidade da casca (Figura 12). Os clones seleccionados foram os BC409, BC410 e GM258. Delimitaram-se 4 parcelas de amostragem retangulares.





*Figura 11 - Talhão 24 da propriedade Calha do Grou. A linha azul representa os limites do talhão 24. Imagem obtida no Google Earth em 2019, logo após o corte dos eucaliptos estudados.*



*Figura 12 - Em cima: parcelas e fuste de clones classificados como maus; abaixo: parcelas e fuste de clones classificados como muito bons. Créditos: P. Soares.*

## 4.2 Inventário

### 4.2.1 Materiais - método tradicional *versus* método LiDAR (HMLS e TLS)

O levantamento pelo método tradicional de inventário recorreu ao seguinte material: equipamento de marca Trimble - receptor GPS ProXH de precisão submétrica, suta de braços, fita métrica, fita sinalizadora, spray de tinta e estacas. Utilizou-se ainda um Drone DJI Phantom 3 Advanced para registo fotográfico da área de estudo.

Para a aquisição de dados LiDAR foi utilizado o seguinte equipamento: um recetor GPS Garmin GPSmap com correção diferencial (DGPS), ABZ TRAX-301, Velodyne VLP-16, arnês com recetor GPS acoplado, Nikon D7200 com sistema de georreferenciação Nikon GPS GP-1, baterias AA, LiPo 3C de 2200mAh e LiPo 4C de 10000mAh e um tablet Lenovo 10" Yoga 2 para ligação ao *software* PLMI durante a recolha de dados.

O ABZ TRAX-301 foi desenvolvido pela Albatroz Engenharia (Lisboa, Portugal), munido do laser Velodyne VLP-16 que emite um pulso de frequência de 905 nm com um FOV horizontal de 360° e 32° vertical. A velocidade de digitalização é ajustável entre 5 a 20 scans/segundo e a máxima distância ao alvo é de 100 m. As restantes especificações deste aparelho podem ser consultadas no site [www.velodynelidar.com](http://www.velodynelidar.com) – Velodyne Lidar Puck – Real-Time 3D Lidar Sensor.

O equipamento é de estrutura portátil, podendo ser montado num arnês e transportado às costas ou cintura de um operador (método HMLS), ou acoplado ao tejadilho de um veículo (método TLS). O laser está representado na Figura 13.



*Figura 13 - Laser Velodyne VLP-16. À esquerda o modelo original, ao centro e à direita o modelo criado pela Albatroz Engenharia.*

#### **4.2.2 Trabalho de campo - método tradicional *versus* método LiDAR (HMLS e TLS)**

O levantamento de campo pelo método tradicional de inventário florestal foi realizado no dia 5 abril 2018, onde foram marcadas as árvores e levantada com GPS sub-métrico a localização dos limites das parcelas (Figura 14 e Figura 15). As áreas não correspondem a figuras regulares porque se definiu o número de linhas ( $n_l=4$ ) e o número de árvores por linha ( $n_{al}=10$ ), correspondendo os limites das parcelas aos finais das linhas. Consideraram-se 10 árvores por linha, independentemente do estado da árvore. Ou seja, foram consideradas nestas 10 árvores/linha, árvores secas, mortas e com deformações ao nível da copa ou do tronco, bem como árvores inexistentes e touças. De acordo com o compasso de plantação, as parcelas de forma, aproximadamente, retangular tinham uma área de 144 m<sup>2</sup>. Das 4 linhas que constituem cada parcela, foram selecionadas duas linhas por questões logísticas.

A amostra final inclui um total de 77 árvores, que foram posteriormente abatidas e cubadas (ficha de campo, como exemplo, no ANEXO 2). Segundo o levantamento tradicional, o número de árvores por cada parcela teve a seguinte contagem: Parcela 3 – 20 árvores; Parcela 4 – 19 árvores; Parcela 5 – 20 árvores e Parcela 6 – 18 árvores.

No dia 5 de julho, uma equipa do ISA dirigiu-se à área de estudo para efetuar a cubagem das árvores abatidas. As árvores foram abatidas uma a uma, por um operador de motosserra. A deslocação e desramação foi feita por um processador (Figura 16). O abate teve em consideração a posição relativa das árvores dentro de cada parcela e da área de estudo, seguindo todos os procedimentos de segurança. Após o abate, a equipa de operadores dividiu-se e iniciou o registo das medições de cada árvore para cada uma das parcelas (Figura 16). Foram registados os valores do diâmetro do cepo, o diâmetro da base do primeiro toro, o diâmetro a 1,30 m e, a partir de 1,30 m, registou-se os diâmetros sucessivos a cada 1 m de altura. O limite foi considerado ao diâmetro de 7 cm, a partir do qual se considerou a bicada.



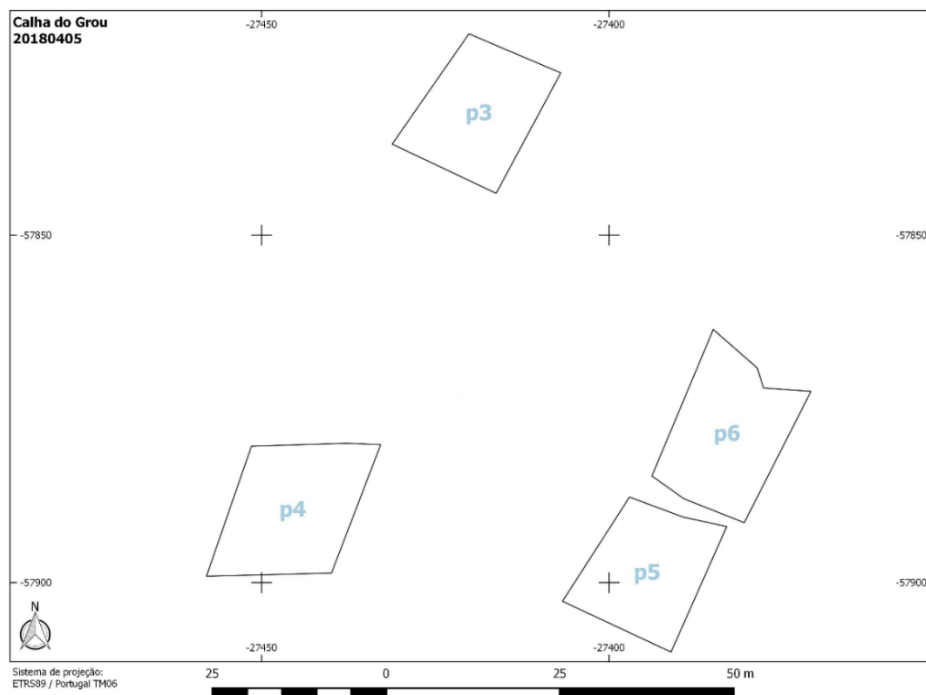


Figura 14 - Localização das parcelas de amostragem obtidas com GPS sub-métrico no dia 5 de abril de 2019; p3 e p4 – parcelas clones “muito bons”; p5 e p6 – parcelas clones “maus”.



Figura 15 - Área de estudo e respetiva localização das parcelas. Imagem obtida no Google Earth (2019).



*Figura 16 - Processamento das árvores abatidas com processador e registo das medições de cada árvore. Créditos: P. Soares.*

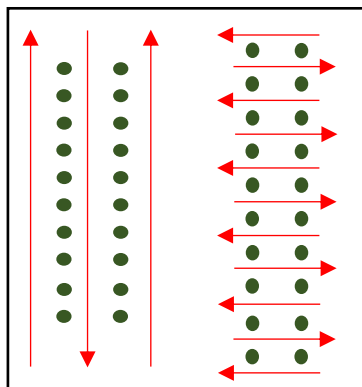
A primeira ida ao campo para realização do levantamento pelo método TLS foi efetuada no dia 3 de março de 2018. No dia 19 de abril de 2018 efetuou-se o levantamento pelo método HMLS e finalizou-se o levantamento pelo método TLS, uma vez que houve alguns problemas técnicos que impossibilitaram a conclusão do registo dos dados na primeira data.

Regressámos ao campo com os dois equipamentos LiDAR no dia 15 de maio de 2018 para as últimas medições. Uma vez que os mapas resultantes das nuvens de pontos LiDAR foram insatisfatórios, voltou-se ao campo para confirmar as localizações das árvores obtidas pelos métodos LiDAR, essa ida ocorreu no dia 25 de junho de 2018. No dia 4 de julho de 2018 fez-se o registo aéreo e fotográfico da área de estudo. As imagens foram obtidas com a câmara do drone DJI Phantom 3 Advanced e podem ser observadas no Anexo 3.

A recolha de dados LiDAR com o HMLS efetuou-se com a passagem do LiDAR no interior de cada parcela de estudo. O percurso realizado foi definido de maneira a minimizar os efeitos de oclusão (Bauwens et al. 2016), ziguezagueando entre as árvores da parcela,



primeiramente em concordância com o comprimento da parcela e, depois, em concordância com a largura da parcela como está representado na Figura 17.



*Figura 17 - À esquerda, o percurso do operador com HMLS em concordância com o comprimento da parcela; à direita, percurso do operador em concordância com a largura da parcela. Os círculos verdes simbolizam as árvores, a vermelho o percurso realizado pelo operador.*

O levantamento pelo método HMLS é facilitado quando existem dois operadores, o operador na dianteira vai equipado com o arnês de suporte ao LiDAR e define a velocidade de andamento; o segundo, segue na retaguarda com o *tablet* de suporte ao levantamento, direcionando o operador de dianteira, como demonstra a imagem Figura 18.



*Figura 18 - Operadores de levantamento com HMLS; a imagem foi obtida em pinhal na Mata Nacional de Leiria.*

Para o levantamento pelo método TLS, o ABZ-TRAX301 foi montado no tejadilho e transportado por um veículo de 4 rodas (Figura 19). O veículo de transporte do equipamento



deslocou-se a uma velocidade de, aproximadamente, 10 km/h, a uma distância do alvo inferior a 40 metros. O veículo deslocou-se nas periferias do talhão 24, descrevendo o percurso descrito pela linha azul da Figura 11.

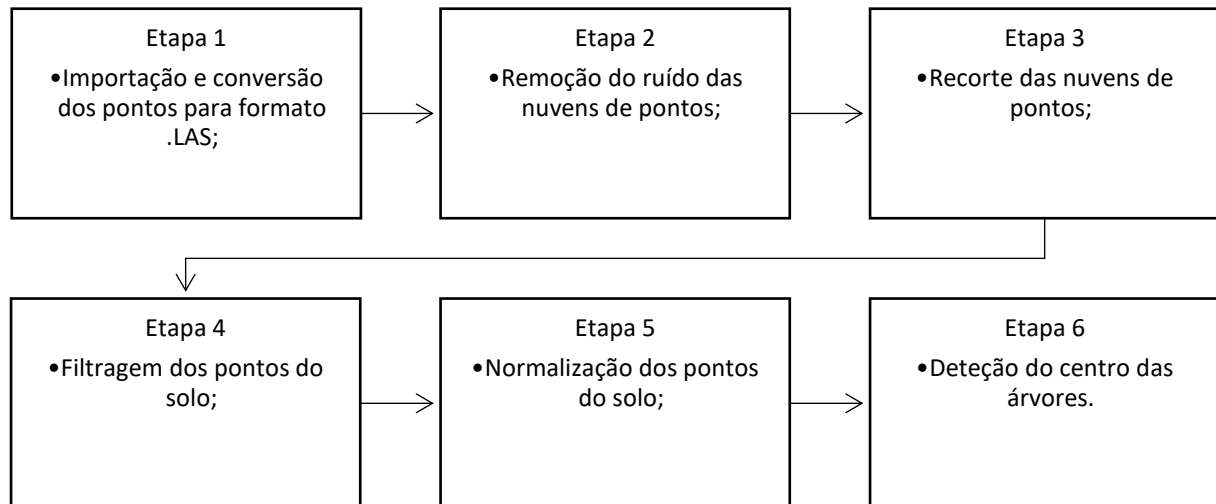


*Figura 19 - Montagem do ABZ-TRAX301 na caixa da carrinha e no tejadilho do veículo.*

#### **4.3 Processamento dos dados LiDAR**

Os dados recolhidos pelos dois métodos LiDAR, foram pré-processados e processados em gabinete, recorrendo aos *softwares* de apoio. Na Figura 20 está apresentada a ordem dos procedimentos computacionais levados a cabo para a manipulação das nuvens de pontos LiDAR obtidas pelos métodos TLS e HMLS.

Os procedimentos realizados recorreram a um conjunto de programas, nomeadamente, o *software* PLMI, desenvolvido pela Albatroz Engenharia e usado para as funcionalidade de classificar, exportar e visualizar as nuvens de dados LiDAR, o ArcMap e o QGIS, *softwares* que permitem a georreferenciação e manipulação das nuvens de pontos LiDAR, o CloudCompare que permite a filtragem e visualização 3D das nuvens de pontos LiDAR e o RStudio (R Core Team 2019) que permite a extração de métricas das nuvens de pontos LiDAR.



*Figura 20 - Procedimentos efetuados para o processamento dos dados LiDAR.*

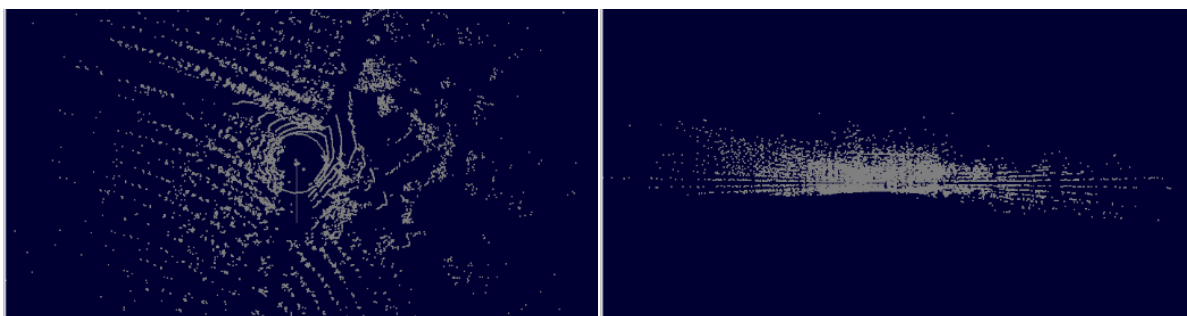
A primeira etapa constitui a importação e conversão dos pontos LiDAR recolhidos em campo pelo TLS e o HMLS, em nuvens de pontos tridimensionais com formato .LAS, recorrendo ao PLMI. A segunda etapa, correspondeu à remoção do ruído de cada nuvem de pontos LiDAR através das funcionalidades do CloudCompare. A terceira etapa consistiu no recorte de cada nuvem de pontos LiDAR por parcela, recorrendo às funcionalidades do ArcMap; numa quarta etapa, foi efetuada a filtragem dos pontos do solo recorrendo aos comandos do pacote lidR do RStudio (Rousset 2019). A quinta etapa consistiu na normalização dos pontos do solo recorrendo ao mesmo pacote. A sexta etapa consistiu na detecção das árvores de cada parcela através do pacote TreeLS do RStudio (Conto, 2019).

## 5. Resultados e discussão

### Etapa 1 – Importação e conversão dos pontos para formato .LAS

Os dados levantados com TLS e HMLS foram importados para um computador e convertidos para o formato específico de dados LiDAR, de extensão .LAS através das funcionalidade do PLMI. Esses dados foram guardados em conjuntos de ficheiros .LAS devidamente identificados com a data da recolha e o tipo de LiDAR utilizado. Obteve-se assim um total de 93 nuvens de pontos LiDAR (o número total de ficheiros .LAS dos dois métodos de levantamento LiDAR).

Após a importação (Figura 21) das nuvens dos pontos LiDAR, efetuou-se uma pré-seleção das nuvens de melhor qualidade. Essa seleção efetuou-se de acordo com alguns critérios, nomeadamente: a densidade de pontos, a quantidade e qualidade dos pontos do solo, a existência de pontos ao longo de toda a altura da árvore e a boa qualidade dos pontos nos troncos das árvores. Devido aos constrangimentos já mencionados que foram ocorrendo durante os levantamentos, não foi possível ir ao encontro dos critérios para todas as nuvens de pontos, dando preferência à densidade dos pontos das nuvens.



*Figura 21 - Visualização de uma nuvem de pontos LiDAR na interface do PLMI. Os pontos cinzentos no fundo azul escuro representam os pontos LiDAR com a sua posição relativa. À esquerda está a visão de cima da nuvem e à direita a visão de uma das laterais da nuvem.*

### Etapa 2 - Remoção do ruído das nuvens de pontos

Entende-se por remoção do ruído das nuvens de pontos, o procedimento que permite a exclusão de aglomerados de *outliers*. No presente estudo, efetuou-se o mesmo procedimento que Padilha (2017), recorrendo à função SOR (*Statistical Outlier Removal*) do *software* CloudCompare que se baseia na distância média à vizinhança. Os valores utilizados neste estudo corresponderam aos valores por defeito.

Ao levantamento com LiDAR está sempre associada a ocorrência de ruído resultante de interferências podendo elas ser originadas por vários fatores. O resultado dessas interferências é representado por um aglomerado de *outliers*. Os *outliers* são observações

atípicas que se diferenciam da média (Padilha, 2017) e a sua ocorrência em nuvens de pontos LiDAR pode ser justificada pelas radiações solares que interferem com o laser, criando uma camada de pontos enviesados (Figura 22).

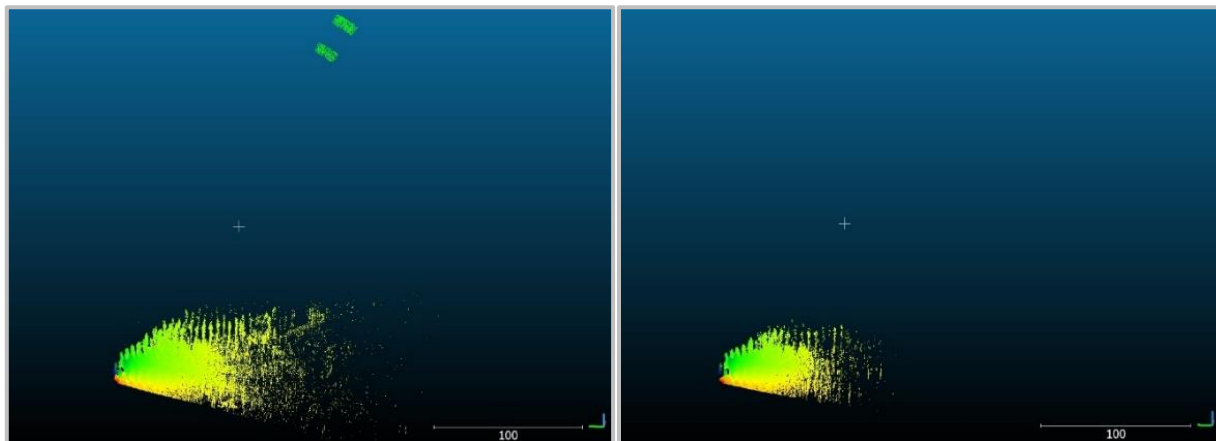


Figura 22 - Visualização em CloudCompare de uma nuvem de pontos com ruído antes (à esquerda) e depois (à direita) de ser filtrada.

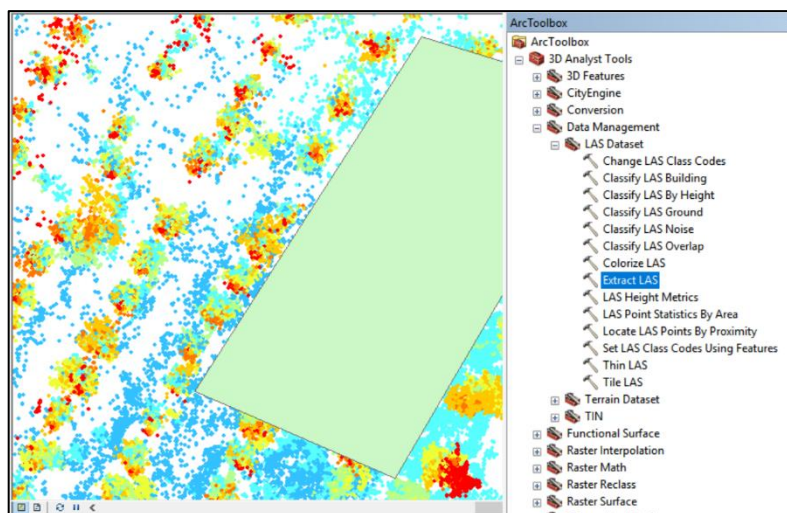
É, portanto, necessário remover esses pontos de forma a não enviesar os resultados e a não perder informação essencial da nuvem. A remoção pode ser efetuada com base na distância média à vizinhança (Padilha 2017, Liang et al. 2018) ou no desvio-padrão (Kartineen et al. 2012).

O programa Cloudcompare dispõe de ferramentas de limpeza, nomeadamente, para a remoção de ruído. O algoritmo de remoção S.O.R (*Statistical Outlier Removal*) baseia-se na distância média à vizinhança recorrendo a dois parâmetros: primeiro - o número de pontos a considerar para calcular a distância média; segundo - o limite a multiplicar ao desvio-padrão.

Por defeito, o valor do primeiro parâmetro é 6 e o segundo é 1. O utilizador pode escolher os valores dos parâmetros de acordo com a qualidade das nuvens de pontos. No presente estudo, utilizaram-se os valores definidos por defeito.

### **Etapas 3 – Recorte das nuvens de pontos**

Com base nas coordenadas obtidas com DGPS das parcelas de estudo e a sua representação em *shapefiles*, efetuou-se o recorte das nuvens de pontos LiDAR através do comando ExtractLAS() do ArcMap (Figura 23), de acordo com os limites das parcelas, resultando num conjunto de nuvens de pontos LiDAR representativas da área da parcela e com o número de árvores observadas.



*Figura 23 - Recorte da nuvem de pontos LiDAR e shapefile da parcela 6 com a ferramenta Extract LAS do ArcMap*

Este método foi replicado para as 4 parcelas de estudo estando associado a erros. Inicialmente, pretendia-se que a identificação das árvores fosse efetuada através da atribuição de etiquetas diretamente na nuvem de pontos, tendo sido elaborado na forma de algoritmo desenvolvido por um estagiário da Albatroz Engenharia, tornando o processo acima descrito obsoleto. Devido a limitações de tempo, não nos foi possível adaptar o algoritmo do colega para o atribuir às nossas nuvens de pontos.

#### **Etapa 4 - Filtragem dos pontos do solo**

Entende-se por filtragem dos pontos do solo, a separação dos pontos de uma nuvem de pontos LiDAR, como pontos de solo e de não-solo tendo por base um algoritmo de filtragem. Em 1998, Kraus e Pfeifer desenvolveram o algoritmo que serviu de base para outros algoritmos de filtragem, baseando-se na atribuição de um determinado peso a todos os pontos da nuvem de pontos LiDAR e segundo o qual, estes seriam dispostos num plano entre o solo e a vegetação.

O comando criado para este fim é o `lasground()` do pacote `lidR` (Roussel et al. 2019) do R e permite escolher dois algoritmos de filtragem, o algoritmo `csf()` (Cloth Simulation Filter) desenvolvido por Zhang et al. (2016) ou o algoritmo `pms()` (Progressive Morphological Filter) desenvolvido por Zhang et al. (2003). No estudo em questão, utilizou-se o algoritmo `csf()` que classifica os pontos como “solo” ou “não-solo” de acordo com o atributo `Classification` dos pontos LiDAR (Zhang et al. 2016, Roussel et al. 2019). As classes vão desde o valor 0 ao valor 31 e a descrição de cada uma pode ser consultada em ASPRS (2013). A descrição do comando `lasground()` pode ser consultada em Roussel et al. (2019).

Função (ver ANEXO 4):

```
>grnd_cld = lasground(cld_P3_TLS, csf(sloop_smooth = TRUE, class_threshold = 0.5,
    cloth_resolution = 0.5, rigidness = 1L, iterations = 500L,
    time_step = 0.65))
```

A escolha do algoritmo teve por base a versatilidade da função e a facilidade de utilização. De facto, o algoritmo `csf()` tem como vantagens recorrer a parâmetros relativos à nuvem de pontos facilmente mensuráveis, pode ser aplicado a vários tipos de paisagens e pode ser implementado em nuvens de pontos LiDAR sem classificação prévia (Zhang et al. 2016).

O algoritmo `csf()` requer informação sobre a nuvem de pontos (Roussel et al. 2019), atribuindo um respetivo valor de acordo com essas características. O Quadro 2 apresenta os argumentos, a respetiva descrição e os valores utilizados no presente estudo para o algoritmo `csf()`.

*Quadro 2 - Argumentos da função `csf()`, respetiva descrição e valores adotados no estudo.*

Argumento	Descrição	Valor
Sloop_smooth	Permite a redução de erros de processamento. Se existem declives acentuados o valor é TRUE, caso contrário é FALSE.	FALSE
Class_threshold	A distância à nuvem simulada para classificar a nuvem de pontos entre solo e não-solo. Por defeito, o valor é 0,5.	0,5
Cloth_resolution	A distância média entre pontos da nuvem. Por defeito, o valor é 0,5	0,5
Rigidness	Declividade do terreno. 1 se o terreno for plano, 2 se for médio e 3 se for acidentado. Por defeito, o valor é 1.	*
Iterations	Número máximo de repetições para a simulação do plano. Por defeito, o valor é 500.	500
Time_step	Intervalo de tempo para a simulação sob gravidade. Por defeito, o valor é 0,65	0,65

\*o valor atribuído variou de parcela para parcela. Às nuvens de pontos das parcelas 3 e 4 foi atribuído o valor 3 e às nuvens de pontos das parcelas 5 e 6 foi atribuído o valor 1.

## **Etapas 5 - Normalização da nuvem de pontos**

Entende-se por normalização da nuvem de pontos, a subtração de um Modelo Digital de Terreno (MDT) aos pontos da nuvem de pontos, criando uma nova nuvem cuja cota ao nível do solo é 0 (Roussel et al. 2019). O MDT, que serve como base ao comando `lasnormalize()`, pode ser obtido com recurso a três algoritmos distintos, o algoritmo `tin()`, o algoritmo `kriging()` e o algoritmo `knnidw()`. No presente trabalho, o MDT foi obtido através do algoritmo de interpolação espacial, designado por `tin()`.

Este algoritmo funciona de acordo com os conceitos da triangulação Delaunay criando uma rede irregular de triangulação – triangulated irregular network (Kersting et al. 2004, Maltamo et al. 2006), numa camada raster, ou seja, uma representação baseada em pontos individuais da nuvem .LAS.

Função (ver ANEXO 4):

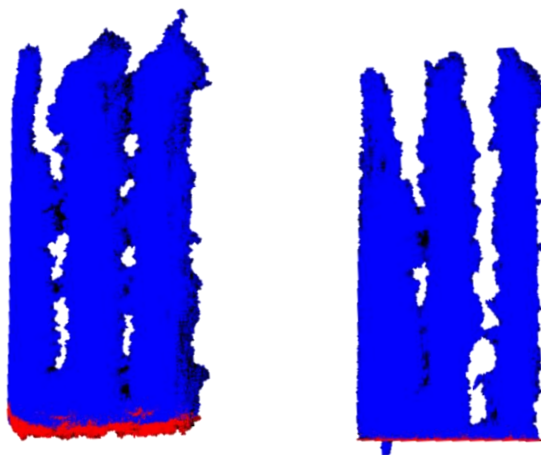
```
>norm_cld = lasnormalize(grnd_cld, tin())
```

O *input* ao comando `lasnormalize()` é a nuvem de pontos LiDAR classificada para os pontos do solo resultante do comando `lasground()`. O *output* é uma nuvem de pontos LiDAR normalizada com uma coluna extra dos valores originais das cotas, `Zref`, possibilitando a reversão da normalização. O comando `lasnormalize()` está presente no pacote `lidR` do R podendo ser consultado em Roussel et al. (2019).

O comando `lasnormalize()` necessita que os pontos da nuvem de pontos LiDAR estejam classificados como solo ou não-solo (Roussel et al. 2019). O atributo “Classification” representa a classe de um ponto cujo valor tem associado um determinado significado que pode ser consultado na tabela 9 de ASPRS (2013). O *output* do comando `lasnormalize()` é uma nuvem de pontos em que os pontos do solo estão todos à mesma cota 0, como se pode observar o exemplo da parcela 5, na Figura 24.

As nuvens de pontos LiDAR utilizadas no presente estudo não tinham pré-classificação. Um ponto LiDAR não classificado é representado pelo valor 0 (ASPRS, 2013). De facto, quando se calculou a média da coluna do atributo “Classification” para cada nuvem de pontos, o valor devolvido foi 0.

Idealmente, os pontos das nuvens de pontos teriam sido classificados com classes entre o valor 2 (“Ground”) e o valor 5 (“High Vegetation”), uma vez que a área de estudo se tratava de uma área florestal com vários níveis de vegetação. Este inconveniente refletiu-se na qualidade dos valores estimados pelas nuvens de pontos LiDAR.



*Figura 24 - Normalização da parcela 5 pelo método TLS, perspectiva lateral da parcela. À esquerda, a nuvem de pontos antes da normalização e à direita a mesma nuvem de pontos normalizada. A vermelho - pontos classificados como solo; a azul - pontos classificados como vegetação*

## **Etapla 6 – Detecção dos centros das árvores**

A individualização das árvores é uma etapa fulcral para obter valores biométricos ao nível da árvore individual. Para a deteção da árvore, já existem vários algoritmos, alguns permitem a deteção das árvores diretamente a partir da nuvem de pontos LiDAR (Li et al. 2012), outros funcionam recorrendo aos modelos de copas (Kaartinen et al. 2012).

No presente estudo, recorreu-se a um comando que recorre diretamente à nuvem de pontos, o comando `treeMap()` disponível no Rstudio, baseada no método de Hough Transformation (Conto 2016, Conto et al. 2017) disponibilizada pelo pacote `TreeLS` de autoria do Engº Tiago do Conto. Este comando tem como função-base a `map.hough()`, o comando é apresentado de seguida como foi corrido no Rstudio.

Função (ver ANEXO 4):

```
> map_trees <- treeMap(norm_cld, method = map.hough(hmin = 1, hmax = 5, hstep =  
  0.5, pixel_size = 0.025,  
  max_radius = 0.30, min_density = 0.1, min_votes = 3))
```

A função `map.hough()` recorre a alguns parâmetros que serão descritos no Quadro 3.



Quadro 3 - Argumentos da função *map.hough()*, respetiva descrição e valores adotados no estudo.

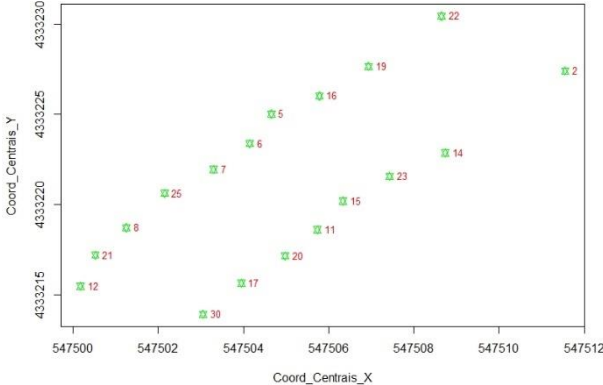
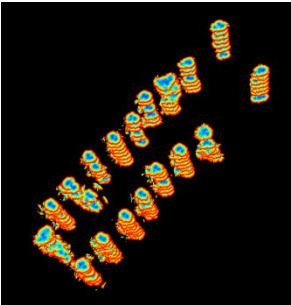
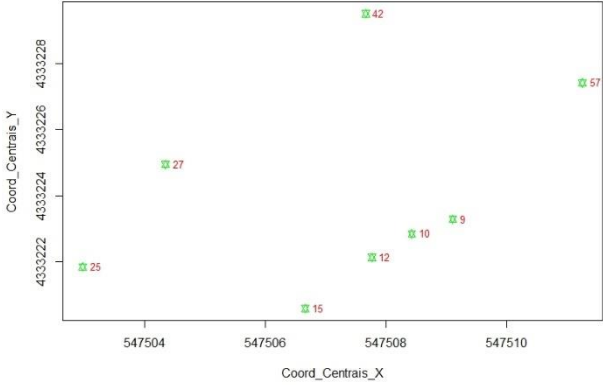
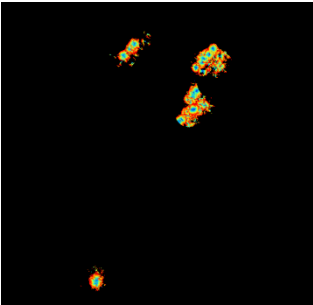
Argumento	Descrição	Valor
<i>hmin</i>	Limite inferior da altura a partir da qual o método será aplicado	1
<i>hmax</i>	Limite superior da altura a partir da qual o método será aplicado	5
<i>hstep</i>	Intervalo de altura sobre o qual o método será aplicado	0,5
<i>pixel_size</i>	Comprimento lateral do pixel para discretizar as camadas da nuvem de pontos enquanto é aplicado o método	0,025
<i>max_radius</i>	Aproximadamente, a maior secção transversão do tronco esperada na nuvem de pontos	0,30
<i>min_density</i>	A mínima densidade de pontos dentro de um pixel	0,1
<i>min_votes</i>	Número mínimo de intersecções (repetições) dentro de um pixel	3

De modo geral, os valores descritos no Quadro 3 foram atribuídos igualmente a todas as parcelas pelos dois métodos. É de notar, no entanto que, para as nuvens de pontos do método HMLS para as parcelas 3 e 4, o valor para o parâmetro *max\_radius* foi de 0,25, por o valor de defeito resultar em piores detecções. O mesmo aconteceu para os parâmetros *hmin* e *hmax* que, para a parcela 4, pelo método HMLS, foram 1 e 3, respetivamente.

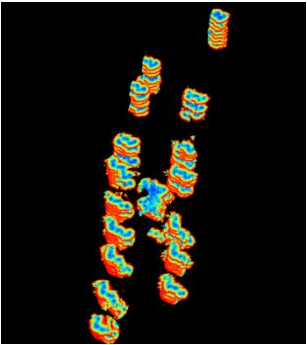
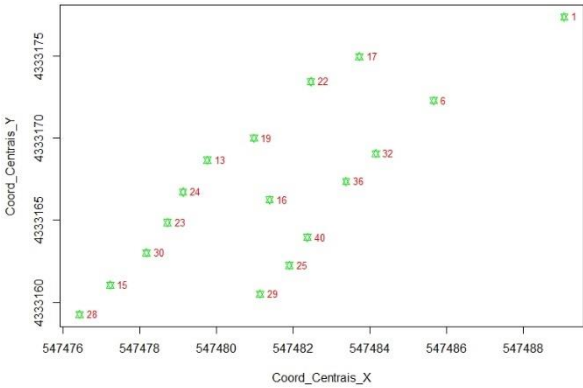
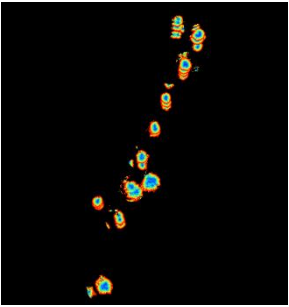
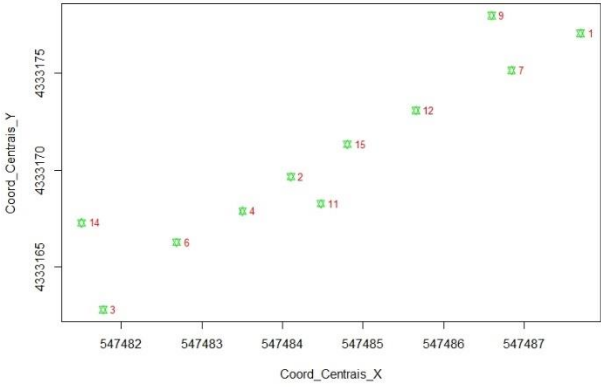
O comando *treeMap()* permite atribuir coordenadas médias (estimadas) centrais das árvores de uma nuvem de pontos usando o conceito matemático de Hough Transformation. É possível visualizar o resultado deste comando recorrendo ao comando *plot()* e atribuição das coordenadas das árvores pode ser observada com o comando *treepositions()* do mesmo pacote, gerando um gráfico das posições das árvores. Os gráficos resultantes destes comandos podem ser observados no Quadro 4 para as várias parcelas.

Dos métodos conhecidos, os melhores resultados obtidos na detecção das árvores e na obtenção de estimativas métricas de árvores individuais correspondem a povoamentos homogéneos ou povoamentos com baixa densidade (Zhang et al. 2015).

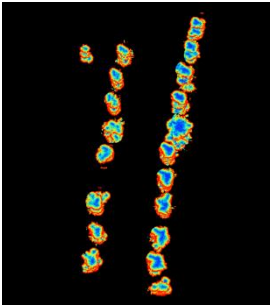
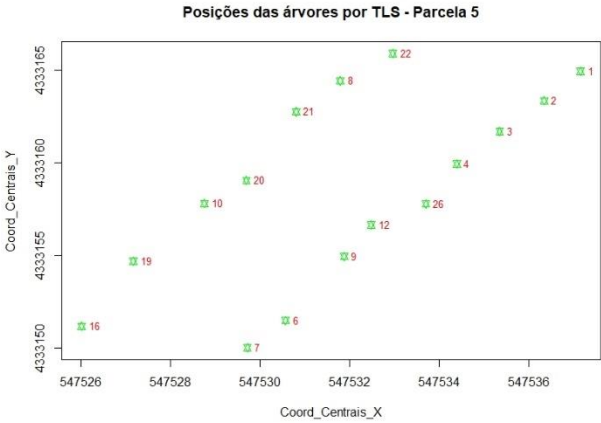
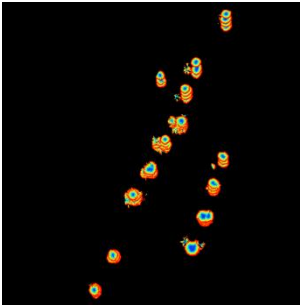
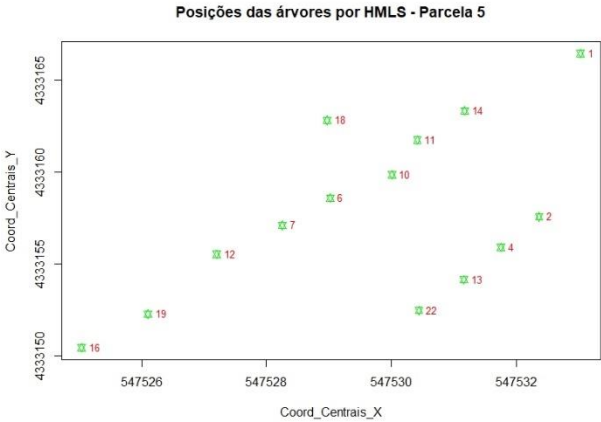
Quadro 4 – Resultados dos comandos TreeMap() e treepositions() para todas as parcelas pelos dois métodos.

P parcela	I ét.	Resultados Plot(TreeMap())	Resultados treepositions()
3	P		<p>Posições das árvores por TLS - Parcela 3</p> 
	LS		
	I		<p>Posições das árvores por HMLS - Parcela 3</p> 
	MLS		

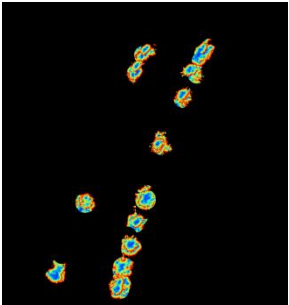
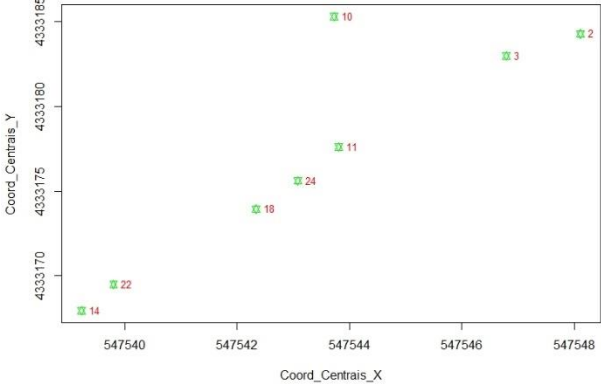
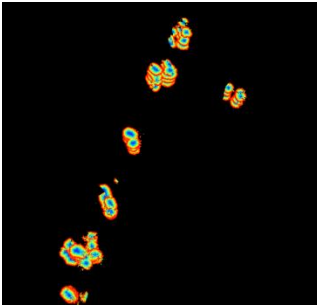
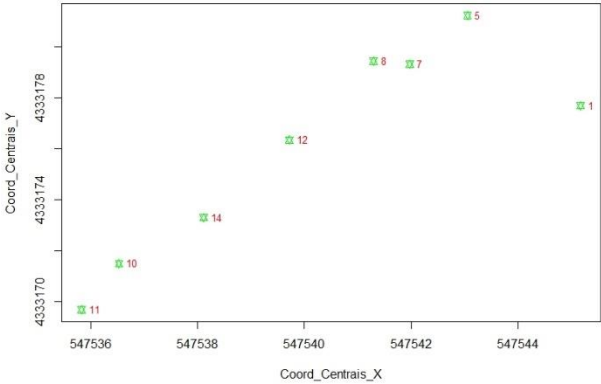
Quadro 4 (cont.) – Resultados dos comandos TreeMap() e treepositions() para todas as parcelas pelos dois métodos.

Parcela	Parceté.	Resultados Plot(TreeMap())	Resultados treepositions()
4	P		<p>Posições das árvores por TLS - Parcela 4</p> 
	MLS		<p>Posições das árvores por HMLS - Parcela 4</p> 

Quadro 4 (cont.) – Resultados dos comandos TreeMap() e treepositions() para todas as parcelas pelos dois métodos.

a	Parcel		Resultados Plot(TreeMap())	Resultados treepositions()
	ét.			
	P5	-		
	LS			
	MLS			

Quadro 4 (cont.) – Resultados dos comandos TreeMap() e treepositions() para todas as parcelas pelos dois métodos.

ela	Parc ét.	M	Resultados Plot(TreeMap())	Resultados treepositions()
	P6	T		
	LS			<p>Posições das árvores por TLS - Parcela 6</p> 
		H		
	MLS			<p>Posições das árvores por HMLS - Parcela 6</p> 

Posteriormente à detecção das árvores através das funcionalidade do Rstudio, exportou-se para tabelas em formato .csv as coordenadas estimadas de cada parcela para cada método. Criou-se um ficheiro Excel comum com essas coordenadas estimadas (resultantes do comando `treepositions()`) e as coordenadas observadas (resultantes do levantamento com GPS sub-métrico) criando-se os gráficos apresentado nas Figura 25, Figura 26, Figura 27, Figura 28, Figura 29, Figura 30, Figura 31 e Figura 32.

De acordo com os respetivos gráficos, efetuou-se a correspondência entre as árvores observadas e as árvores estimadas, procurando fazer corresponder o ID das árvores de coordenadas estimadas (a azul) com o ID das árvores de coordenadas observadas (a laranja). A correspondência teve em consideração a distância à vizinhança entre os pontos da localização das árvores, fazendo a correspondência sempre considerando o ponto mais próximo.

A percentagem de detecção foi calculada de acordo com a razão entre o número de árvores com correspondência e o número total de árvores, por parcela.

A parcela para a qual foram detetadas mais árvores foi a parcela 5, com um total de 28 árvores detetadas pelos dois métodos e uma percentagem de detecção máxima de 80% para o método TLS e de 60% pelo método HMLS; seguida da parcela 3, com um total de 22 árvores detetadas pelos dois métodos, com uma percentagem de detecção de 79% para o método TLS e 37% para o método HMLS. De facto, em média, foram detetadas 65,1% das árvores pelo método TLS e 44,7% pelo método HMLS.

A parcela 3 teve, em média, 58% das árvores detetadas pelos dois métodos, a parcela 4 teve, em média, 50% das árvores detetadas pelos dois métodos; a parcela 5 foi a parcela com percentagem de detecção de árvores, e teve, em média, 70% das árvores detetadas pelos dois métodos; por fim, a parcela com a percentagem mais baixa de detecção de árvores pelos dois métodos, foi a parcela 6, com 42% de árvores detetadas, em média, pelo dois métodos.

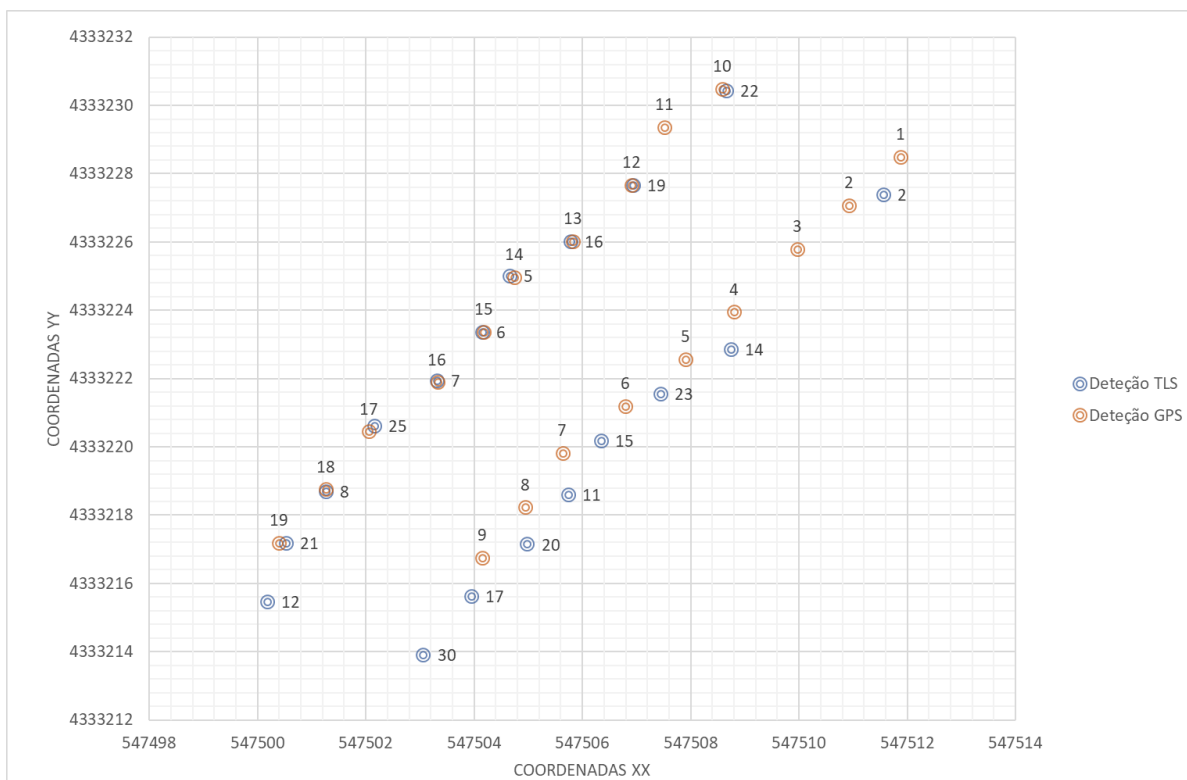


Figura 25 - Posições das árvores da parcela 3, de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul).

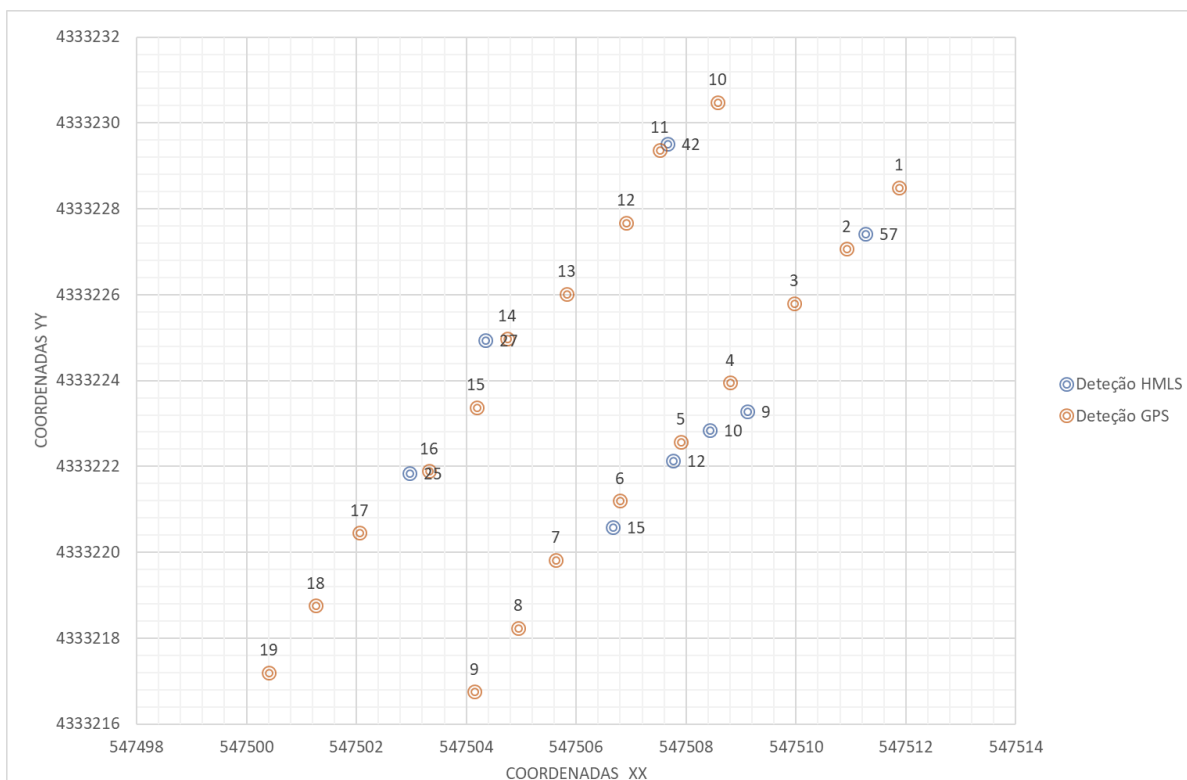


Figura 26 - Posições das árvores da parcela 3 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul).

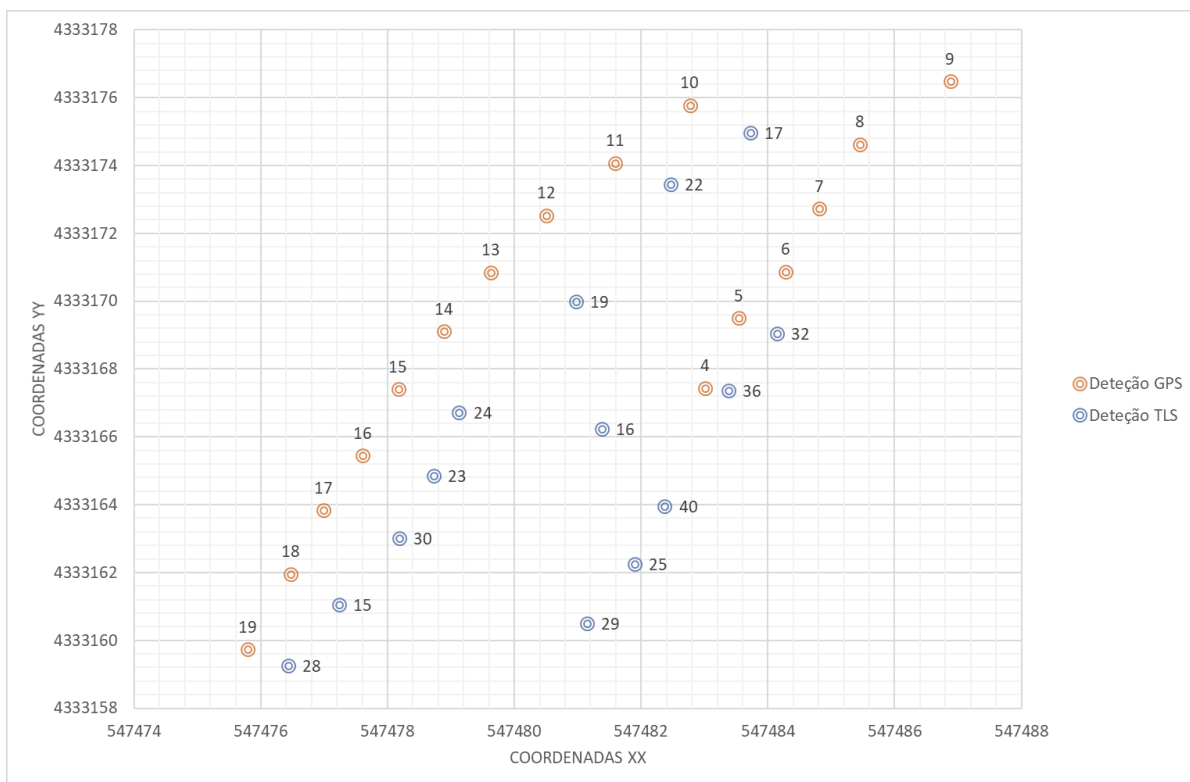


Figura 27 - Posições das árvores da parcela 4 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul).

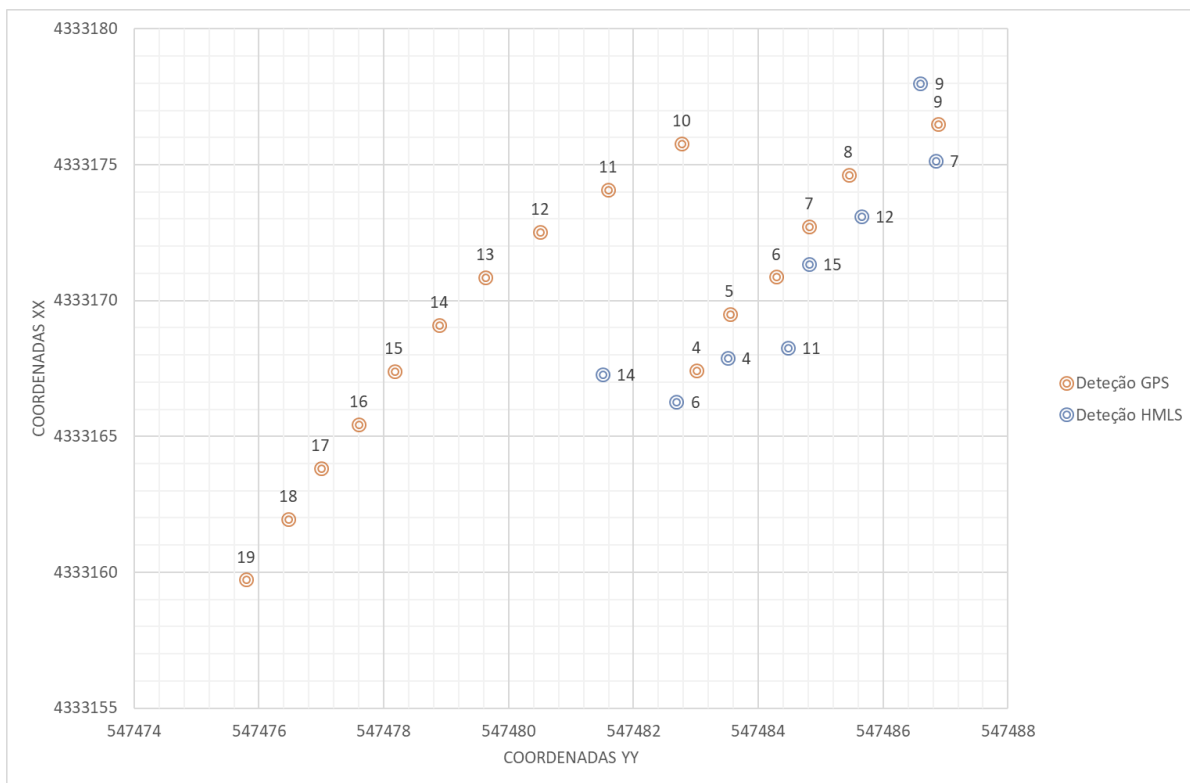


Figura 28 - Posições das árvores da parcela 4 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul).



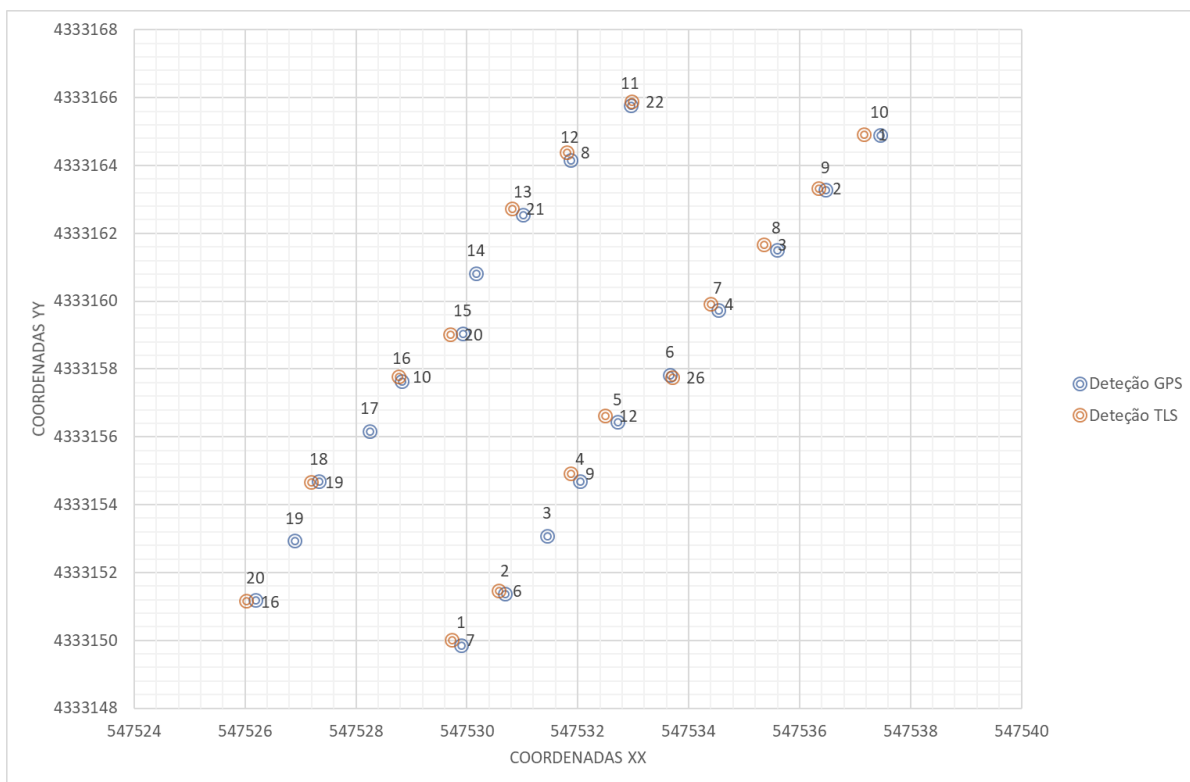


Figura 29 - Posições das árvores da parcela 5 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul).

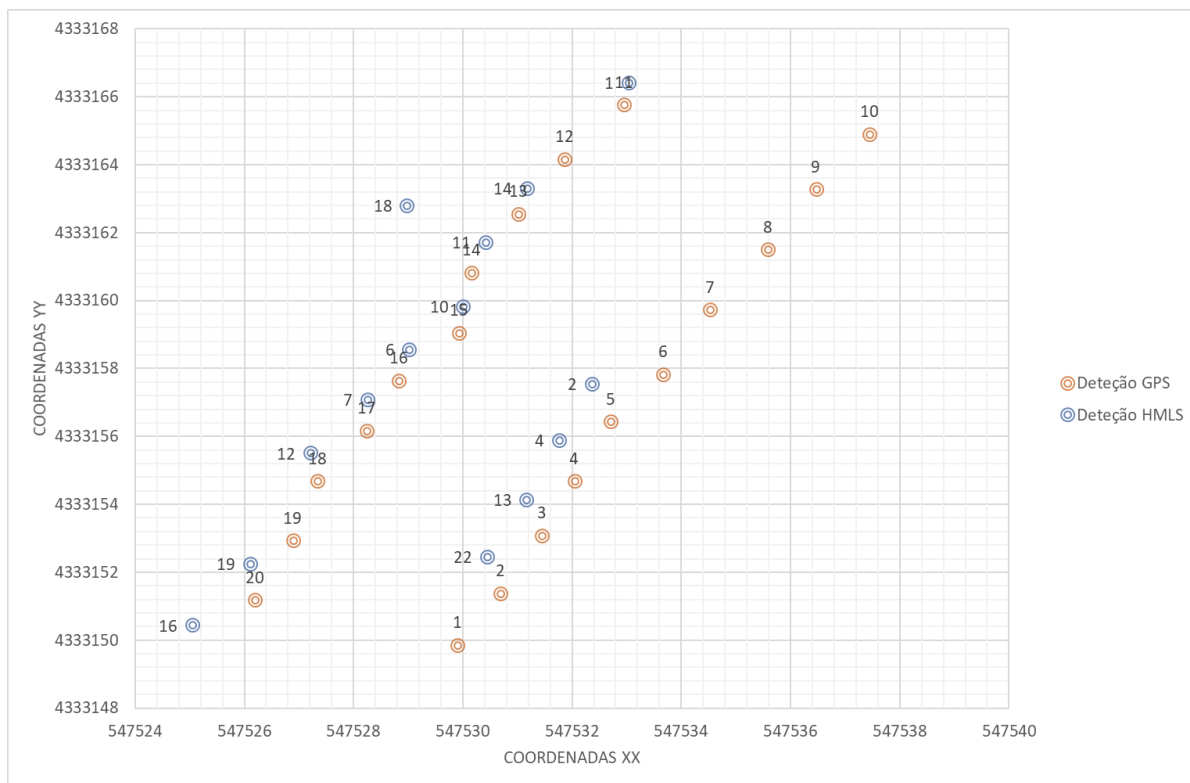


Figura 30 - Posições das árvores da parcela 5 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul).

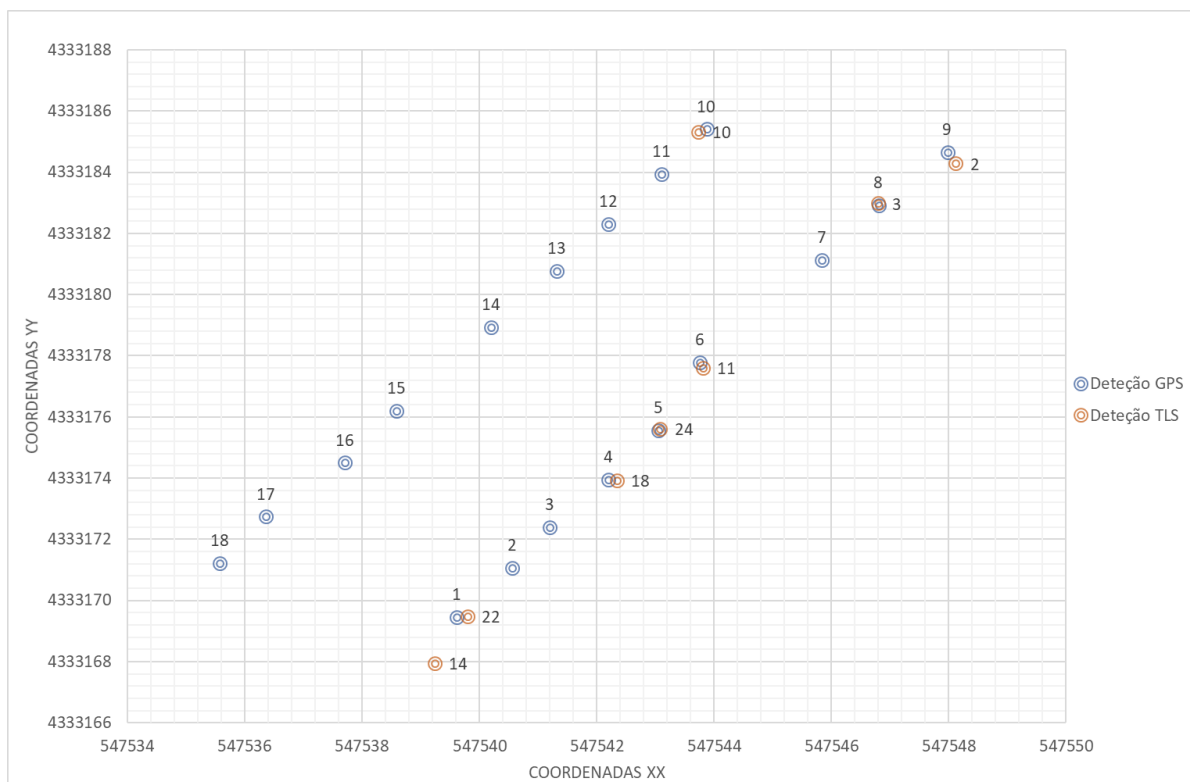


Figura 31 - Posições das árvores da parcela 6 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método TLS (a azul)

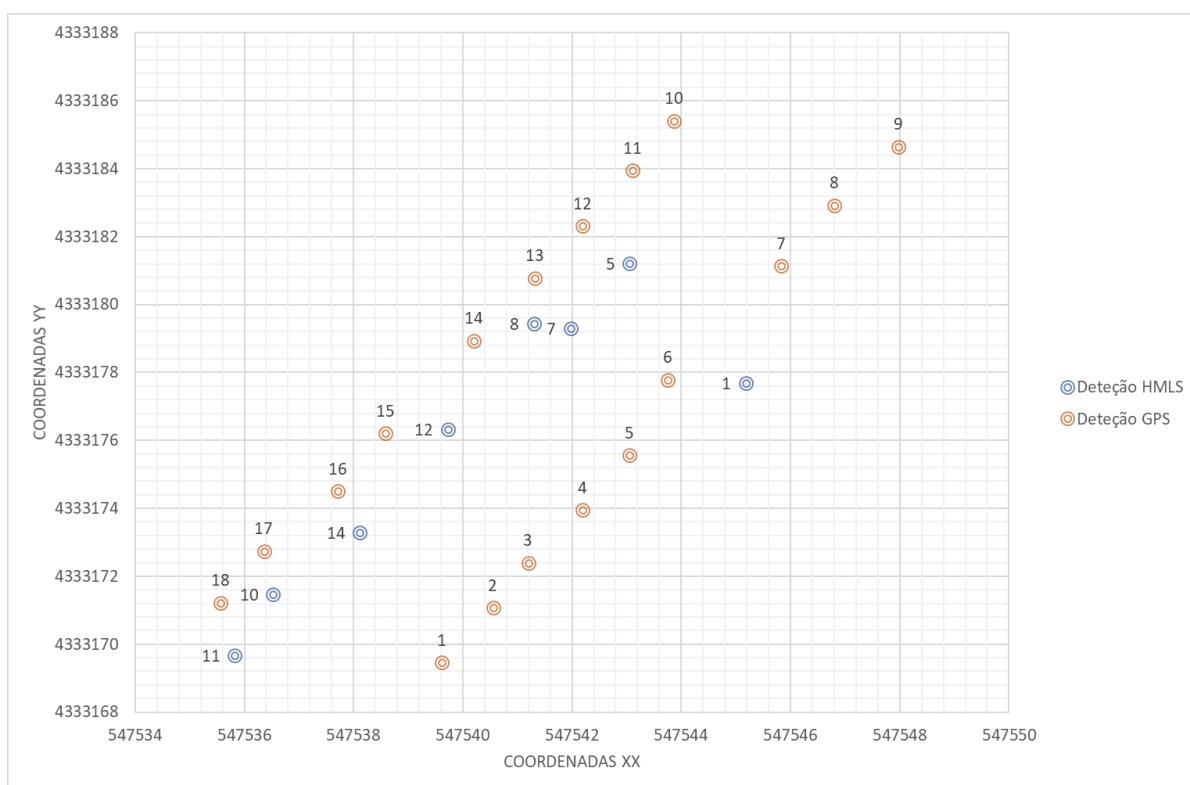
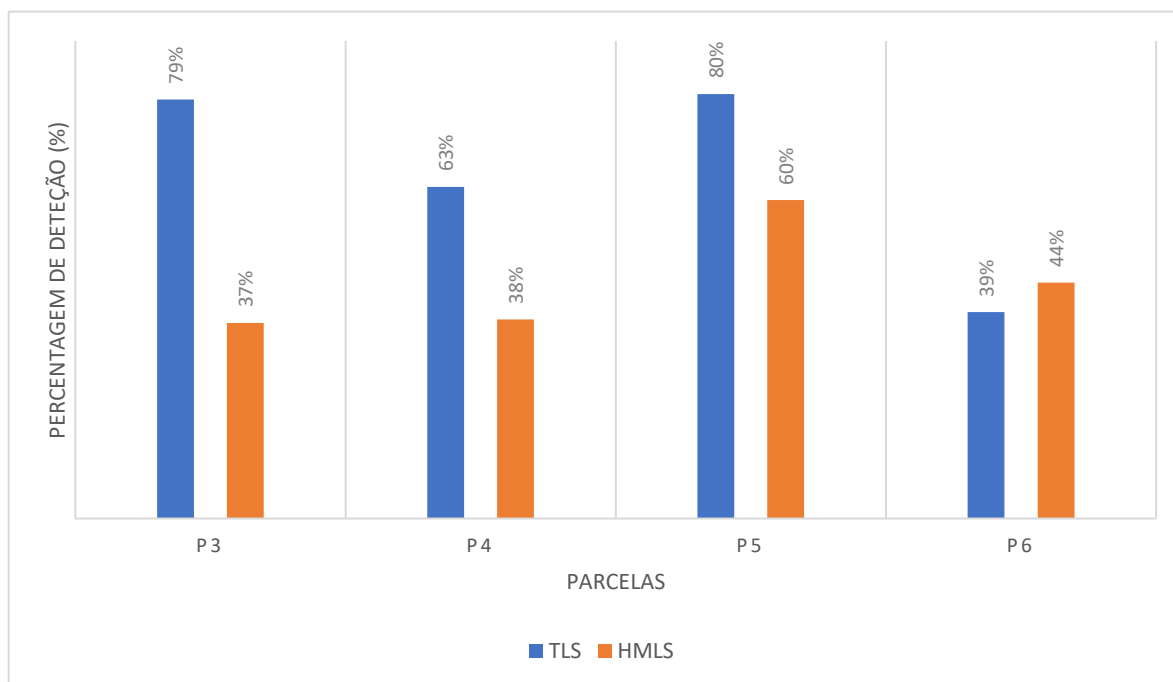


Figura 32 - Posições das árvores da parcela 6 de acordo com o método tradicional (a laranja) e pelo método HMLS (a azul).

A correspondência resultante da observação dos gráficos apresentados, foi resumida num gráfico de barras com as percentagens para cada parcela e cada método (Figura 33).



*Figura 33 - Percentagens de detecção das árvores por parcela pelos métodos TLS e HMLS em relação ao número de árvores determinado pelo método tradicional.*

Os resultados demonstraram que o método que confere resultados de melhor qualidade na detecção das árvores é o método TLS, com um valor máximo de 80% de árvores detetadas, num total de 20 árvores. Em contrapartida, o método HMLS teve o seu máximo de 60% detetadas para a mesma parcela, no mesmo total de árvores.

Como era de esperar, o método TLS apresentou melhores resultados de detecção de árvores em comparação com o método HMLS.

As parcelas 3 e 4, caracterizadas por clones de melhor qualidade, apresentaram percentagens de detecção elevadas pelo método TLS e baixas pelo método HMLS, enquanto que as parcelas 5 e 6 de pior qualidade apresentaram valores inesperados.

Ao contrário do que seria de esperar, a percentagem de detecção máxima pelo método TLS correspondeu a uma das parcelas de pior qualidade, nomeadamente a parcela 5 com o clone GM258. O mesmo aconteceu para o método HMLS, que teve a sua percentagem de detecção máxima igualmente associada à parcela 5 com o mesmo clone. O mesmo não aconteceu com a parcela 6, com o mesmo clone GM258, cujas percentagens de detecção de árvores, foi abaixo dos 50% tanto para o método TLS como para o método HMLS.

De facto, ao observar o Quadro 4, compreende-se a superioridade das nuvens de pontos da parcela 5 para os dois métodos, comprovando assim, que a qualidade da nuvem de pontos, no que toca à deteção das árvores, provoca maior influência nos resultados estimados, do que a qualidade/aspecto dos clones em si.

### Procedimentos Adicionais

Numa fase inicial do presente estudo, pretendeu-se extrair os diâmetros estimados às várias alturas do tronco a partir das nuvens de pontos LiDAR. Efetuou-se alguns procedimentos para registar uma primeira abordagem de obtenção de métricas LiDAR ao nível da árvore. Por diversas limitações ao estudo que foram sendo apresentadas e por impossibilidade de tempo, os procedimentos adicionais apresentaram resultados que não foram tratados, no entanto, o seu registo fica aqui contemplado para informação futura.

Os troncos foram individualizados recorrendo à função *lasclipcircle* que recorta a nuvem de pontos LiDAR de acordo com as coordenadas centrais estimadas de cada árvore, obtidas na etapa 6. A segmentação vertical das árvores é a etapa que permite a obtenção dos diâmetros às várias alturas do tronco e continua a ser o maior desafio para obtenção de métricas da árvore individual com LiDAR.

A segmentação do tronco foi possível através da aplicação da função *pref\_HT()*, esta função, pede as coordenadas centrais de cada tronco e o intervalo de altura a que corresponde ao comprimento dos toros, no presente caso, escolheu-se um intervalo de 1 em 1 metro de altura. A função *fit\_RANSAC\_circle()* permitiu, para cada toro, obter o diâmetro ajustado à largura de cada subsecção. Com a função *plotCylinder()* foi possível observar-se a segmentação dos troncos durante a segmentação, como se pode ver na Figura 34.

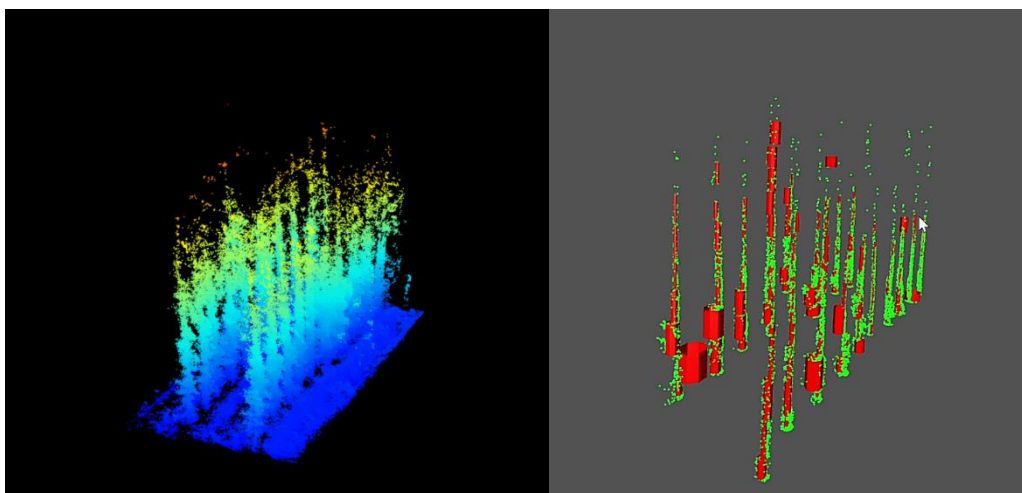


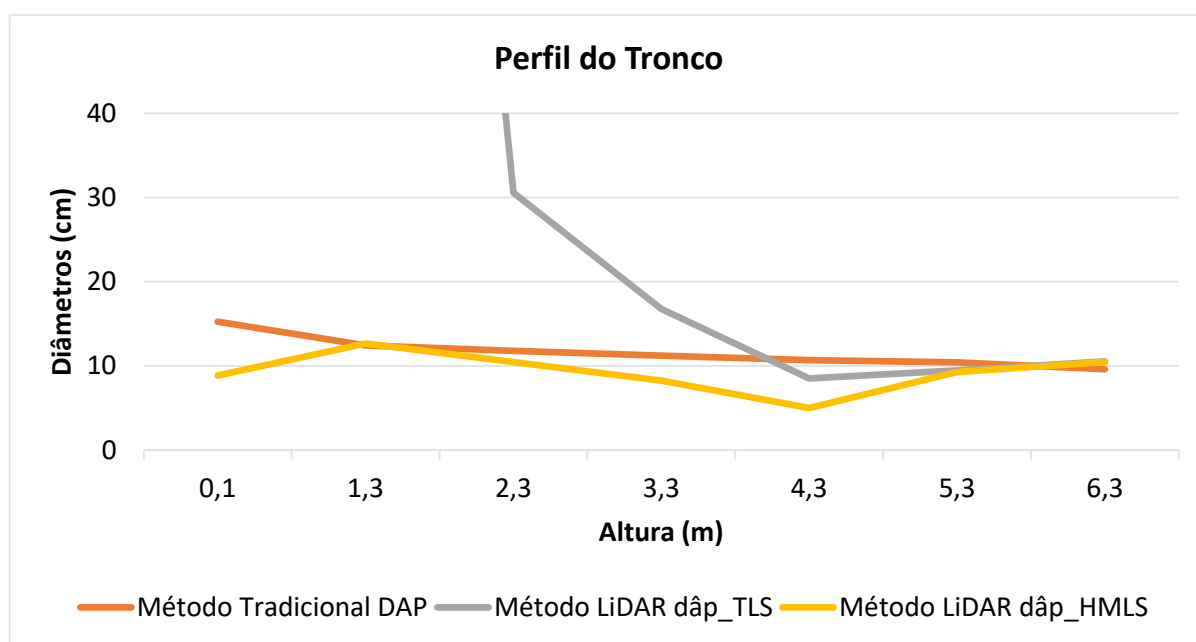
Figura 34 - Visualização da nuvem de pontos da parcela 5 pelo método TLS (à esquerda) e a segmentação da mesma nuvem de pontos pelo comando *plotCylinder* (à direita).

Aplicando as funções acima descritas, obteve-se alguns resultados sendo de caráter meramente informativo, uma vez que os procedimentos já se encontram desatualizados (novos pacotes de comandos do R tornaram estes obsoletos) e não foram revistos por impossibilidade de tempo.

O Quadro 5 apresenta os diâmetros observados (Método tradicional) e estimados (Método LiDAR) ao longo do tronco da árvores 1 da parcela 4. A visualização é apresentada na Figura 35.

*Quadro 5 - Diâmetros estimados e observados da árvore 1 da parcela 4, resultantes do comando `fit_RANSAC_circle`*

Método Tradicional		Método LiDAR	
h (m)	dap (cm)	dap_TLS (cm)	dap_HMLS (cm)
0,08	15,3	68,4	8,9
1,3	12,5	205,1	12,7
2,3	11,8	30,6	10,4
3,3	11,2	16,8	8,3
4,3	10,7	8,5	5,0
5,3	10,4	9,5	9,3
6,3	9,6	10,5	10,4



*Figura 35 - Gráfico representativo dos perfis do tronco da árvore 1 da parcela 4 de acordo com os diâmetros do quadro anterior*

A Figura 35 e o Quadro 5 evidenciam a existência de valores de diâmetros estimados muito superiores aos observados, nomeadamente para o método TLS à altura do cepo e do 1,30m da árvore. Situações idênticas foram encontradas em outras árvores de outras parcelas, não tendo sido encontrado nenhum padrão relativo à qualidade do clone.

## 6. Conclusões

As medições de campo são normalmente feitas em parcelas de amostragem, Para representar sistematicamente gradientes de composição e estrutura ao longo de uma área extensa, as parcelas de amostragem são úteis e extrapoláveis para grandes áreas de floresta. Medir as árvores com precisão em parcelas de amostragem, assim como conduzi-las ao longo de um período de tempo são cruciais para compreender a dinâmica do ecossistema florestal.

No entanto, medições precisas não são reais, principalmente em meios naturais, pois estes são caracterizados por elevada complexidade estrutural e, conseqüentemente, as medições são difíceis de executar. O número de parcelas de amostragem que podem ser medidas na prática é reduzido, o que representa uma baixa representatividade da heterogeneidade ambiental e potenciais tendências na inferência, uma vez que os erros afetam as estimativas para áreas grandes.

A rudimentaridade e falta de eficiência dos equipamentos de inventário, são um desafio corrente quando se trata de medições de campo e, conseqüentemente há características dendrométricas que raramente são medidas devido à morosidade e custos associados à medição pelos métodos convencionais, evidenciando uma janela de oportunidade para efetuar as medições através de sistemas LiDAR, o qual, apesar de ainda estar em desenvolvimento, apresenta inúmeras potencialidades.

Por estes motivos, se considerou pertinente a aplicação de uma tecnologia abrangente e versátil, como o sistema LiDAR, com potencial para cobrir grandes áreas de floresta assegurando a precisão dos resultados a custos acessíveis. E, por isso, se idealizou o presente estudo com o propósito de avaliar o potencial do LiDAR através de dois métodos de LiDAR terrestre (TLS e HMLS), avaliando o potencial de cada um deles.

Bauwnes et al. (2016) compararam estes métodos para a aplicação dos mesmos a Inventário florestal e o estudo veio a comprovar que o HMLS conseguia detetar um número superior de árvores no povoamento em relação ao TLS. Tal não sucedeu no presente estudo; de facto, o equipamento que maior percentagem de árvores por parcela detetou foi, efetivamente, o TLS. Tal pode ser justificado por vários motivos, principalmente aquele que se prende com a qualidade do levantamento do HMLS, tanto pelo percurso do LiDAR como pelo terreno acidentado e a ausência de uma georreferenciação dos dados, o que resultou em dados LiDAR de má qualidade e de difícil processamento. Comprovou-se ainda que o levantamento com HMLS só é vantajoso para terrenos regulares e percursos retos.

Associadas à detecção das árvores, foram detetadas menos árvores por parcela do que as que existiam na realidade. A subestimação do número de árvores poderá estar relacionada, mais uma vez, com a má qualidade da nuvem de pontos resultando da ausência de uma

georreferenciação correta dos dados, comprovando a importância em utilizar pontos de referência em campo para a obtenção de nuvens de pontos de melhor qualidade.

Concluiu-se ainda que a melhoria nos processos associados à utilização do algoritmo SLAM (*Simultaneous Localization and Mapping*) seria uma enorme vantagem ao presente estudo.

Durante os trabalhos que constituem esta tese detetaram-se algumas limitações, as quais nos impediram de atingir alguns dos objetivos a que nos tínhamos proposto inicialmente, nomeadamente, a avaliação da forma da árvore individual, conseguida através da estimativa de diâmetros as várias alturas. Assim identificaram-se os seguintes constrangimentos:

- (a) Os dados LiDAR exportados do PLMI não apresentavam todos os atributos necessários ao processamento dos mesmos, nomeadamente, o tempo do GPS, a classificação e o número de primeiros e últimos retornos;
- (b) Devido à ausência de uma ferramenta de georreferenciação, nomeadamente o SLAM, ou marcar no terreno pontos de referência em recolhas de dados com TLS e HMLS, houve elevada imprecisão associada à posição das nuvens de pontos LiDAR, tendo sido necessário voltar ao campo e recorrer à correspondência manual da posição GPS das árvores de cada parcela;
- (c) A correspondência das posições exigiu a conversão das coordenadas de um sistema para outro, procedimento este que sempre tem erros associados.
- (d) A função lasground que permite a filtragem dos pontos do solo requer a aplicação do algoritmo csf (Cloth Simulation Filter), que, por defeito, classifica os pontos como solo e não solo para um limiar de classe predefinido (class threshold) igual a 0,5. Ao analisarmos os diâmetros das árvores, reparou-se que as alturas de segmentação dos diâmetros extraídos, dependiam da cota mais baixa da nuvem de pontos normalizada. No entanto, essas nuvens de pontos normalizadas, apresentavam valores de z (cota) abaixo de 0, alterando o intervalo das alturas. Para contornar esta limitação, decidiu-se alterar o valor do parâmetro class threshold do algoritmo csf, para 1. Os resultados obtidos foram melhores mas envolveram subestimação do nível do solo.
- (e) A georreferenciação dos ficheiros .LAS foi um dos procedimentos mais acidentados, uma vez que os dados levantados com LiDAR e pelo método tradicional foram registados em sistemas de coordenadas distintos. As coordenadas dos vértices de cada parcela pelo levantamento tradicional, foram obtidas com um recetor GPS e registadas no sistema de coordenadas ETRS98/TM06 Portugal. Já as nuvens de pontos LiDAR foram registadas no sistema de coordenadas WGS84.
- (f) A própria inexperiência do aluno no conhecimento de todas as funcionalidades dos equipamentos e na sua aplicação em campo. Como exemplo, a distância do LiDAR aos



alvos não correspondeu à indicada pelos fabricantes dos equipamentos gerando piores resultados, nomeadamente, a funcionalidade *discrete return* do Velodyne VLP-16 permite recolher, no máximo, o primeiro e o último retorno, quando a distância entre os objetos intersetados é superior a 1 m (Velodyne, N/A) e no método HMLS os alvos estavam a uma distância inferior a 1 m do LiDAR.

- (g) O próprio progresso associado a esta temática, obrigou o aluno a ter que adaptar o estudo inúmeras vezes devido a novas ferramentas e novos comandos criados com melhor qualidade, tornando os anteriores obsoletos.

## 7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AIFF, 2013. *Estudo Prospetivo para o Setor Florestal – Relatório Final*. Associação para a Competitividade da Fileira Florestal.
- ALMEIDA, M. H., Araújo, C., Araújo, J. A., Costa e Silva, F., Neves, I., Paiva, V., Santiago, A., Ribeiro, D. 2005. *Melhoramento Genético do Eucalipto: que Impacto na Realidade?* Centro de Estudos Florestais. Instituto Superior de Agronomia, Tapada da Ajuda. Lisboa.
- ALVES, A., M., Pereira J., S., Silva, J., M., N. 2007. *O Eucalipto em Portugal – Impactes Ambientais e Investigação Científica*. ISAPress. Instituto Superior de Agronomia. Lisboa, Portugal.
- ALVES, M. V. G. 2010. *Estimativa de variáveis florestais com perfilhamento a laser (LiDAR)*. Tese de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. Universidade Federal do Paraná. Curitiba. Brasil.
- ALVES, A. M. Pereira, J. S. Correia, A. V. 2012. “Silvicultura - A Gestão dos Ecossistemas Florestais” *BISA K10-1051* pág. 473. *Caixa XXIV – Plantações clonais de Eucalipto*. Lisboa. Portugal.
- BAUWENS, S., Bartholomeus, H., Calders, K., & Lejeune, P. 2016. “Forest inventory with terrestrial LiDAR: A comparison of static and hand-held mobile laser scanning”. *Forests*, 7(6).
- BARREIRO, S., Tomé, M., Luís, M. 2004. *Manuais de utilização – Relascópio de espelhos de Bitterlich e Telerelascópio*. Relatório Técnico do GIMREF. Instituto Superior de Agronomia, Lisboa. Portugal.
- BORÉM, A. (Eds). 2007. “Biotecnologia Florestal”. Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. Brasil.
- BORRALHO, N. M. G., Almeida, M. H., Potts, B. M. 2007 “O melhoramento do eucalipto em Portugal”. *ISAPress*. Lisboa.
- CARSON, W. W., Andersen, H.-E., Reutebuch, S. E., & McGaughey, R., J. 2004. “LiDAR applications in forestry: An overview”. *ASPRS Annual Conference Proceedings*. Vol. 9.
- CONTO, T. 2016. *Performance of tree stem isolation algorithms for terrestrial laser scanning point clouds*. Master thesis. Southern Swedish Forest Research Center. Alparn.
- CONTO, T., Olofsson, K., Görgens, E., B., Rodriguez, L., C., E., Almeida, G. 2017. “Performance of stem denoising and stem modelling algorithms on single tree point clouds from terrestrial laser scanning”. *Computers and Electronics in Agriculture*. Vol. 143, pp. 165-176.
- GUIMARÃES, MPS, 1991. “Uma perspectiva para a utilidade do estudo da forma das árvores em ensaios de proveniências de *Eucalyptus globulus* Labill”. Relatório do trabalho de fim do curso, ISA, Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa.
- GIONGO, M., Koehler, H. S., Machado, S. do A., Kirchner, F. F., & Marchetti, M. 2010. “LiDAR: princípios e aplicações florestais”. *Pesquisa Florestal Brasileira*, 30(63), 231–244.
- KAARTINEN H., Hyyppä, J., Yu, X., Vastaranta, M., Hyyppä, H.; Kukko, A., Holopainen, M., Heipke, C.; Hirschmugl, M., Morsdorf, F., Naesset, E., Pitkänen J., Popescu, S., Solberg, S., Wolf, B., Wu, J.

2012. "An International Comparison of Individual Tree Detection and Extraction Using Airborne Laser Scanning". *Remote Sensing*. Vol.4, 950-974.
- KERSTING, J., Centeno, J., A., S., Machado, A., M., L., PEDRO, P., C., 2004. "Filtragem De Modelos Digitais De Superfície Derivados Da Varredura A Laser Usando A Triangulação De Dalaunay". *I simpósio de ciências geodésicas e tecnologias da geoinformação – SIMGEO*. Recife: 2004. v. 1, p. 1-10. Amazonas.
- KHOSRAVIPOUR, A., Skidmore, A. K., Wang, T., Isenburg., M., Khoshelham, K. 2015. "Effect of slope on treetop detection using LiDAR Canopy Height Model". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 104 p. 44-52. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2015.02.013>
- KRAUS, K., Pfeifer, N. 1998. "Determination of terrain models in wooded areas with airborne laser scanner data". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Vol. 53, p.193-203.
- KROOKS, A., Kaasalainen, S., Kankare, V., Joensuu, M., Raunonen, P., & Kaasalainen, M. 2014. "Predicting tree structure from tree height using terrestrial laser scanning and quantitative structure models". *Silva Fennica*. Vol. 48(2), p. 1–11.
- LI, W., Guo, Q., Jakubowski, M. K., & Kelly, M. 2012. "A new method for segmenting individual trees from the lidar point cloud". *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, Vol. 78(1), p.75-84.
- LIANG, X., Kankare, V., Hyypä, J., Wang, Y., Kukko, A., Haggrén, H., Vastaranta, M. 2016. "Terrestrial laser scanning in forest inventories". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol. 115, p. 63–77.
- LIANG, X., Kukko, A., Hyypä, J., Lehtomäki, M., Pyörälä, J., Yu, X., Kaartinen, H., Jaakkola, A., Wang, Y. 2018. "In-situ measurements from mobile platforms: An emerging approach to address the old challenges associated with forest inventories". *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. Vol.143, p. 97 – 107.
- MALTAMO, M., Eerikainen, K., Packalén, P., Hyypä, J. 2006. "Estimation of stem volume using laser scanning-based canopy height metrics". *Forestry*, Vol. 79, p. 2 doi:10.1093/forestry/cpl007.
- MORS DORF, F., Meier E., Kötz, B., Itten, K. I., Dobbertin, M., Allgöwer, B. 2004. "LIDAR-based geometric reconstruction of boreal type forest stands at single tree level for forest and wildland fire management". *Remote Sensing of Environment*. Vol.92, p. 353-362.
- MUCKE, W, Hollaus, M, Pfeifer, N, Scroiff, A, Deák, B. 2013. "Comparison of discrete and full-waveform ALS features for dead wood detection". *ISPRS Annual fo the Photogrammetry. Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-5/W2. *ISPRS Workshop Laser Scanning*, Antalya. Turkey.
- NEWNHAM, G. J., Armston, J. D., Calders, K., Disney, M. I., Lovell, J. L., Schaaf, C. B., Danson, F. M. 2015. "Terrestrial Laser Scanning for Plot-Scale Forest Measurement". *Current Forestry Reports*, 2(3), 214–214.

- PADILHA, A., S., 2017. *Emprego de dados laser scanner terrestre e de sensores embarcados em veículos aéreos não tripulados para a extração de variáveis dendrométricas*. Dissertação ao grau de Mestre em Engenharia Florestal. Lages, Santa Catarina, Brasil
- R CORE TEAM, 2019. R: a language and environment for statistical computing. [WWW Document]. URL <https://www.r-project.org/> (accessed 9.12.19).
- RAUMONEN, P., Casella, E., Calders, K., Murphy, S., Åkerbloma, M., & Kaasalainen, M. 2015. "Massive-Scale Tree Modelling From TLS Data". *ISPRS Annals of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, II-3/W4, 189–196.
- RYDING, J., Williams, E., Smith, M. J., & Eichhorn, M. P. 2015. "Assessing handheld mobile laser scanners for forest surveys". *Remote Sensing*, 7(1), 1095–1111.
- SAVILL, P., Evans, J., Auclair, D., Falck, J. 1997. "Plantation Silviculture in Europe". *Oxford University Press*. New York. United States. ISBN 0-19-854908-3. K10-1039 BISA.
- SWETNAM, T. L., Falk, D. A., Lynch, A. M., Yool, S. R. 2014. "Estimating individual tree mid- and understory rank-size distributions from airborne laser scanning in semi-arid forests". *Forest Ecology and Management*. Vol. 330. P. 271-282. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2014.07.011>
- TOMÉ, M. 2014. *Inventário Florestal - Apontamentos para apoio às aulas teóricas*. Textos Pedagógicos. Universidade de Lisboa - Instituto Superior de Agronomia. Centro de Estudos Florestais. Lisboa.
- UZQUIANO, S., Martínez, J., San Martín, R., & Bravo, F. 2014. "Mediciones dendrométricas y dasométricas mediante técnicas LiDAR y fotogramétricas". *Cuadernos de La Sociedad Española de Ciencias Forestales*, Vol. 40, p. 193–202.
- VOSSELMAN, G., Hellmeyer, A., Centeno, J., Mitishita, E., Phillips, J. 2007. "Sensoriamento Remoto por LIDAR [Material de apoio às aulas do curso de Sensoriamento Remoto por LIDAR]". *XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*. Florianópolis. Brasil.
- WILKES, P., Lau, A., Disney, M., Calders, K., Burt, A., Tanago, J., Bartholomeus, H., Brede, B., Herold, M. 2017. "Data acquisition considerations for Terrestrial Laser Scanning of forest plots." *Remote Sensing of Environment*. Vol. 196, p. 140-153. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.04.030>
- ZHANG, K., Chen, S., Whitman, D., Shyu, M. Yan, J., Zhang, C. 2003. "A Progressive Morphological Filter for Removing Nonground Measurements from Airborne LiDAR Data". *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing*, Vol. 41. NO 4. P.0196-2892
- ZHANG, C., Zhou, Y., & Qiu, F. 2015. "Individual Tree Segmentation from LiDAR Point Clouds for Urban Forest Inventory". *Remote Sensing*. Vol. 7(6), p. 7892–7913.
- ZHANG, W., Qi, J., Wan, P., Wang, H., Xie, D., Wang, X., Yan, G. 2016. "An Easy-to-Use Airborne LiDAR Data Filtering Method Based on Cloth Simulation". *Remote Sensing*. Vol. 8, p.501.
- ZHOU, S., Kang, F., Li, W., Kan, J., Zheng, Y., He, G. 2019. "Extracting Diameter at Breast Height with a Handheld Mobile LiDAR System in an Outdoor Environment". *Sensors*, 19, 3212.

## 8. WEBGRAFIA

CloudCompare – version 2.6.1. User Manual.

<http://www.cloudcompare.org/doc/qCC/CloudCompare%20v2.6.1%20-%20User%20manual.pdf>.

Consultado a 5 de Setembro de 2019

Conto, T. 2019. “Terrestrial Point Cloud Processing of Forest Data – Package ‘TreeLS’” CRAN.

<https://cran.r-project.org/web/packages/TreeLS/TreeLS.pdf> . Consultado a 2 de setembro de 2019.

Heutzel, S. Signal to noise ratio and preprocessing. Presentation FMRI SNR & Preprocessing. Duke University. Carolina do Norte. EUA. <http://slideplayer.com/slide/7063212/> Consultado a 9 de janeiro 2018.

Matos, J. 2007. “Geodesia e Sistemas de Referência”. Departamento de Engenharia Civil e Arquitetura. Instituto Superior Técnico.

<https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/3779571948535/Geodesia%20e> Consultado a 6 de setembro de 2019.

Paul, T. 2018. “LiDAR Basics: The Coordinate System”. <https://hackernoon.com/lidar-basics-the-coordinate-system-a26529615df9> Consultado a 6 de setembro de 2019.

RIEGL, 2019. “Data sheet – RIEGL VUX-1UAV”. [http://www.riegl.com/uploads/tx\\_pxpriegl/downloads/RIEGL\\_VUX-1UAV\\_Datasheet\\_2019-06-03.pdf](http://www.riegl.com/uploads/tx_pxpriegl/downloads/RIEGL_VUX-1UAV_Datasheet_2019-06-03.pdf)

Consultado a 5 de setembro de 2019.

Roussel, J., Auty, D., Boissieu, F., Meador, A. S. 2019. Airborne LiDAR Data Manipulation and Visualization for Forestry Applications - Package ‘lidR’. CRAN. <https://cran.r-project.org/web/packages/lidR/index.html> Consultado a 4 de setembro de 2019.

Safe Software, “LiDAR and Coordinate Systems” [https://docs.safe.com/fme/html/FME\\_Desktop\\_Documentation/FME\\_Coordinate\\_Systems/CoordSys/coord\\_sys\\_lidar.htm](https://docs.safe.com/fme/html/FME_Desktop_Documentation/FME_Coordinate_Systems/CoordSys/coord_sys_lidar.htm) Consultado a 6 de setembro de 2019.

ASPRS. 2013. “LAS Specification – version 1.4 – R13”. The American Society for Photogrammetry & Remote Sensing. Bethesda, Maryland. [https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS\\_1\\_4\\_r13.pdf](https://www.asprs.org/wp-content/uploads/2010/12/LAS_1_4_r13.pdf) . Consultado a 4 de setembro de 2019.

Velodyne LiDAR Puck – Real-Time 3D LiDAR Sensor. 2018. [http://www.mapix.com/wp-content/uploads/2018/07/63-9229\\_Rev-H\\_Puck-Datasheet\\_Web-1.pdf](http://www.mapix.com/wp-content/uploads/2018/07/63-9229_Rev-H_Puck-Datasheet_Web-1.pdf) Consultado a 5 de setembro de 2019.

## **ANEXOS**



## Anexo 1 – Área de estudo com informação das manchas de clones





## Anexo 2 – ficha de campo

### Tese de Mestrado da Madalena Rascão Parcelas clonais de eucalipto – Calha do Grou

Equipa: \_\_\_\_\_ data: 5/7/2018



Cada parcela é constituída por 30 árvores dispostas em 3 filas (10 árvores/fila)

Nº da parcela: 13

Nº da fila: 1

Nº da árvore: 1

Árvore em pé:  
dap1 (cm): 11.1 dap2 (cm): 11.6

Observações:

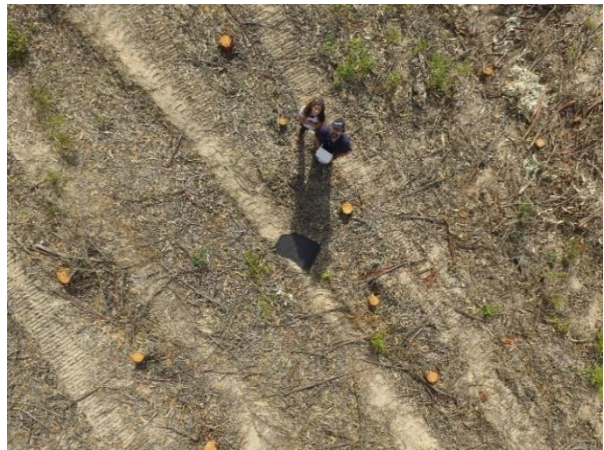
14.30  
13.0  
1.30  
12.0  
árvore abatida:  
ht (m) 9.10 hbc (m) 15.60 hdec7 (m) 11.33  
9.40  
1.30  
10.90

nº toro	compr toro (m)	dcc1 (cm)	dcc2 (cm)
0 (cepo)	2.10	14.0	13.5
1 (1.30)	1.80	—	—
2	1	10.5	10.9
3	1	10.4	10.5
4	1	10.0	9.9
5	1	9.6	9.4
6	1	8.9	9.1
7	1	8.6	8.9
8	1	8.3	8.5
9	1	7.3	7.5
10	1	7.0	7.4
11	1		
12	1		
13	1		
14	1		
15	1		
16	1		
17	1		
18	1		
19	1		
20	1		
21	1		

nº toro	compr toro (m)	dcc1 (cm)	dcc2 (cm)
22	1		
23	1		
24	1		
25	1		
26	1		
27	1		
28	1		
29	1		



### Anexo 3 – Captação de imagens do povoamento com VANT





## Anexo 4 - Código R

```
#Criado a 2 de Setembro de 2019 por Madalena Rascão

#Código para deteção e segmentação de nuvens de pontos TLS e HMLS

#Adaptado dos pacotes: "TreeLS" lançado a 13 de Março de 2019, versão 1.0 e "lidR" lançado a 2 de Janeiro de 2019

#---Se é a 1ªVez que corre este código, faça instalação dos pacotes: ---#

#o pacote "TreeLS" Depende de:

install.packages("data.table") #necessariamente versão >=1.12.0

install.packages("magrittr") #necessariamente versão >=1.5

install.packages("lidR") #necessariamente versão >=2.0.0

#install.packages("rgl") #necessariamente versão >=0.99.0 #instalar o pacote atualizado à versão 3.5.0 do R:

install.packages("rgl", repos="http://R-Forge.R-project.org")

install.packages("raster") #necessariamente versão >=2.8.19

#instalação da mais recente versão do pacote TreeLS:

install.packages('devtools', dependencies = TRUE)

devtools::install_github('tiagodc/TreeLS')

library(TreeLS)

#O pacote "lidR" Depende de:

install.packages("sp")

library(lidR)

#---Caso já tenha os pacotes instalados---#

library(lidR)

library(TreeLS)

require(ggplot2)

#Colocando na diretoria necessária

setwd("C:/Rtools")

#diretoria do ficheiro de entrada

indir <- "C:/TESE"

#Carregar as nuvens de pontos TLS- readLAS():

cld_P3_TLS = readLAS()
```



```
plot(cld_P3_TLS)
summary(cld_P3_TLS)
#Carregar as nuvens de pontos HMLS - readLAS()
cld_P3_HMLS = readLAS()
plot(cld_P3_HMLS)
summary(cld_P3_HMLS)
#filtragem e classificação dos pontos do solo - lasground(); csf()
grnd_cld = lasground(cld_P3_TLS, csf(sloop_smooth = TRUE, class_threshold = 0.5,
                                     cloth_resolution = 0.5, rigidness = 1L, iterations = 500L,
                                     time_step = 0.65))
#visualização da nuvem de pontos classificada - plot()
plot(grnd_cld, color = "Classification")
#normalização da nuvem de pontos
norm_cld = lasnormalize(grnd_cld, tin())
plot(norm_cld, color = "Classification")
#remoção de atributos inúteis do ficheiro de entrada
cld_las = LAS(norm_cld@data[,1:3])
#plot(cld_las)
#mapeamento das árvores - treeMap()
map_trees <- treeMap(norm_cld, method = map.hough(hmin = 1, hmax = 3, hstep = 0.5, pixel_size =
0.025, max_radius = 0.25, min_density = 0.1, min_votes = 3))
#visualização das árvores mapeadas - plot()
plot(map_trees, color = 'Radii')
#obtenção de uma tabela com as coordenadas das árvores - treePositions()
xymap = treePositions(map_trees)
#Alterar o gráfico com os centros das parcelas e acrescentar etiquetas aos pontos:
plot(xymap$X, xymap$Y, main="Posições das árvores por HMLS - Parcela 6",
      xlab="Coord_Centrais_X", ylab="Coord_Centrais_Y", pch=11, col="green", cex.axis = 1 )
text(xymap$X, xymap$Y, labels = xymap$TreeID, cex=0.8, pos=4, col="red")
#exportando a tabela com as coordenadas das parcelas:
write.csv2(xymap, "C:/TESE/OUTPUTS/cld_P6_HMLS.csv")
```